

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



“CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA EN
FRECUENCIA DEL SENSOR TCS3200
APLICANDO CONTEO DE PERIODOS DE
DOS SEÑALES ELÉCTRICAS”

TESIS

que como requisito parcial para obtener
el título de INGENIERO EN
ELECTRÓNICA, presenta:

Elias Misael Reyes Iñiguez

Director:

Dr. Daniel Avalos González

Mexicali, B.C, junio de 2023

RESUMEN

Los sensores de color están presentes en diversas aplicaciones, los sensores son de vital importancia para lograr la interpretación de nuestro entorno por máquinas o algoritmos que realicen tareas automáticas o puedan aumentar nuestra capacidad de entender nuestro entorno, el sensor de color TCS3200 es fácil de adquirir e implementar, existen diferentes artículos donde se utiliza este sensor para diferentes actividades, en esta investigación se pretende caracterizar su respuesta en frecuencia utilizando el conteo de periodos de dos señales eléctricas e identificar cuales aplicaciones son compatibles con este sensor y el método de medición así como poder ser una investigación de referencia para los futuros usuarios que utilizaran dicho sensor.

ABSTRACT

Color sensors are present in a wide variety of applications, the color sensors are of vital importance for the interpretation of our environment in machinery or algorithms to automate tasks. The TCS3200 color sensor is easy to acquire and implement, there are different articles where this sensor is used for different activities, in this Research it is intended to characterize it using the Counting periods of two electrical signals method, identify which applications it could have the greatest reach and to be able to be a reference investigation for future users who will use it.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi universidad, la Universidad Autónoma de Baja California por su formación académica y ser un entorno en el cual se forman excelentes profesionistas.

A mi familia de quienes siempre recibí su apoyo para seguir estudiando gracias por permitirme tener las facilidades para poder terminar mis estudios, así como poder enfocar mi tiempo en algo que me apasiona, les dedico a mis amados padres Manuel Reyes y Lorena Iñiguez a mi pareja Sarah Corona, así como a mis hermanos y amigos este logro, como una meta más conquistada.

A mi tutor el Dr. Daniel Avalos González, gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, gracias por introducirme en el campo del conocimiento de este trabajo, así como ser de inspiración para seguir el camino del conocimiento.

A mis maestros que a lo largo de mi carrera nos impartieron sus conocimientos a mí y a mis compañeros, siempre tratarnos con respeto y una excelente actitud creando así un entorno donde el aprendizaje es fácil y gustosamente adquirido.

Contenido

Agradecimientos	3
Lista de figuras	5
Introducción	6
1. Planteamiento del problema	8
2. Hipótesis	9
3. Objetivos	10
4. Marco Teórico	11
4.1 Señales periódicas	
4.2. Sistemas de adquisición de datos	13
4.3. Modulación y demodulación	15
4.4. Control y estabilización de frecuencia	16
4.5. Fundamentos y teoría del color	18
4.6. Sensores con salida en frecuencia	21
4.6.1. Ventajas de los sensores con salida en frecuencia	21
4.6.2. Desventajas de los sensores con salida en frecuencia	23
4.7. Sensores de color y sus aplicaciones	24
4.8. Descripción y funcionamiento del sensor TCS3200	26
4.9. Estabilidad y precisión en la medición de componentes de color	28
4.10. Medición de frecuencia mediante el método de correspondencia de pulsos	29
5. Desarrollo, Diseño experimento	30
5.1. Sistema de configuración y posicionamiento del sensor TCS3200	32
5.2. Placa de circuito impreso	33
5.3. Sistema de medición	35
5.4. Experimento	37
6. Análisis de Resultados y metodología	38
7. Conclusiones	45
7.1. Trabajos futuros	47
Anexos	48
Bibliografía	80

LISTA DE FIGURAS

<i>Número</i>	<i>Página</i>
1. Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos.....	13
2. Aliasing en muestreo de señales.....	14
3. Diagrama Básico en bloques de un PLL	17
4. Espectro electromagnético y longitudes de onda para la luz visible.....	18
5. Ojo huma y retina.....	19
6. Curvas de sensibilidad del ojo.....	20
7. Reflexión de la luz en los objetos.....	24
8. Diagrama de bloques básico del sensor TCS3200.....	26
9. Iteraciones en mediciones con diferentes filtros del sensor TCS3200....	31
10. Impresión 3D para fijar el sensor TCS3200.....	32
11. Diagrama de conexiones del circuito impreso.....	33
12. Placa de circuito impreso.....	34
13. Placa de circuito impreso donde se unen el sensor de color TSC3200 y el modelo 3D para dar más estabilidad a la señal.....	35
14. Circuito contador de coincidencias.....	36

INTRODUCCIÓN

Los sensores cada vez se vuelven más indispensables en la vida cotidiana e industrialización, son fundamentalmente necesarios para la interpretación de nuestro entorno en los sistemas electrónicos y computacionales, con ellos las computadoras pueden tomar decisiones en base a sus mediciones; desde un sistema de riego automatizado, hasta una aeronave que necesita tomar mediciones de su entorno para tener un correcto funcionamiento.

El color es una propiedad de los materiales y se presenta debido a las ondas electromagnéticas de energía que absorbe cada cuerpo [1], esto depende de la estructura molecular del material, el color es utilizado por ejemplo para determinar la madurez de cierta fruta o si se encuentra en buen estado, de esta manera las personas determinamos la calidad de cierto alimento o si puede ser perjudicial para la salud.

Los sensores con salida en frecuencia (*FDS-frequency domain sensors*) en un principio no recibían demasiada atención puesto que los métodos para medición de frecuencia por los años 1930 no estaban tan perfeccionados como en la actualidad, estos eran métodos analógicos en consecuencia el beneficio de la salida en frecuencia no se conseguía, cuando llegaron los contadores digitales de frecuencia los FDS empezaron a recibir una mayor atención [2].

Existe una gran variedad de aplicaciones para los sensores de color en diferentes sectores como: química, ciencias naturales, industria de alimentos y bebidas, científico-técnico y aplicaciones industriales de sensado de color.

Los sensores de color detectan las longitudes de onda entre 400-700nm, que es la luz visible para el ser humano, y son la parte central de diferentes industrias [3] por ejemplo, la industria textil, comida, publicidad optoelectrónica y el procesado de imágenes. En la industria textil es de utilidad para tener un valor cuantitativo de las variaciones de color durante el proceso de manufactura.

Existe una gran variedad de sensores para medir diferentes magnitudes físicas, en este caso de estudio nos enfocaremos en el sensor de color TCS3200 el cual tiene salida en frecuencia y es de fácil acceso.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sensores de color son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones para medir el color de objetos y garantizar que se produzcan con los tonos correctos. La caracterización de los sensores de color es esencial para garantizar su correcto funcionamiento y precisión en la medición del color. Además, la caracterización de los sensores de color permite conocer sus limitaciones y capacidades, lo que es fundamental para su uso en aplicaciones que requieran mediciones precisas y confiables.

En este trabajo de tesis se propone la caracterización del sensor de color TCS3200 basado en el método de conteo de periodos, el cual permite obtener información de la señal en el dominio de la frecuencia. En particular, se busca documentar el rango de frecuencias para cada componente de color, así como la estabilidad de las frecuencias de salida. La caracterización del sensor de color propuesto en este trabajo permitirá conocer sus limitaciones y capacidades en términos de precisión y sensibilidad, lo cual es fundamental para su uso en aplicaciones que requieran mediciones de color precisas y confiables.

En diversos fenómenos físicos es necesario realizar medición de frecuencia; la medición de la frecuencia como portador de información tiene ventajas sobre la medición del voltaje en términos de precisión y sensibilidad. Además, se han desarrollado técnicas avanzadas de medición de frecuencia. La caracterización de un sensor de color basado en el método de conteo de periodos es un área de estudio por explorar con el potencial para garantizar su correcto funcionamiento y precisión en la medición del color. Con este trabajo de tesis, se espera contribuir al conocimiento en la caracterización del sensor de color TCS3200 y en la medición de la frecuencia.

2. HIPÓTESIS

La caracterización del sensor de color TCS3200 basado en el conteo de periodos permitirá establecer el rango de frecuencias para cada componente de color y evaluar la estabilidad de las frecuencias de salida.

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es realizar la caracterización del sensor de color TCS3200 basado en el método de conteo de periodos, con el fin de conocer sus características en términos de precisión y sensibilidad en la medición de componentes RGB.

A continuación, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Establecer el rango de frecuencias de salida para cada componente RGB del sensor de color mediante el método de conteo de periodos.
- Evaluar la estabilidad de las frecuencias de salida del sensor de color durante un período prolongado de tiempo.
- Comparar las características anteriores del sensor de color mediante el uso de dos dispositivos de medición de frecuencia: un medidor comercial y un circuito experimental de conteo de periodos.

Para el logro de los objetivos planteados, se usará como objeto para muestra de color, una pantalla con la capacidad de generar 16,777,216 colores.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. SEÑALES PERIÓDICAS

La frecuencia es un concepto sumamente importante en los dispositivos electrónicos la forma más común de representarla es con la ecuación 1.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Esta ecuación representa la cantidad de ciclos medidos dentro una unidad de tiempo, mayormente utilizada sobre un segundo y se expresa en (Hz) esto es determinado por el sistema internacional de unidades (SI).

El periodo es la cantidad de tiempo que transcurre entre dos eventos consecutivos en una señal periódica, la frecuencia y el periodo están inversamente relacionados entre sí [4]. Las señales periódicas se repiten en el tiempo, estas pueden ser representadas en una función la cual tiene la misma repetición de variable dependiente en todos los periodos, estas señales pueden ser de tipo continuas o discretas [5].

El análisis de Fourier o espectral con la cual se puede estudiar la distribución de una señal en función de la frecuencia, el análisis de Fourier nos permite descomponer una señal periódica en una sumatoria de senos y cosenos como se observa en la ecuación 2. Este análisis de señales con las series de Fourier es muy importante en las señales eléctricas ya que estos componentes representan los armónicos de estas señales, con lo cual se puede realizar un análisis más extenso de estas señales.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (2)$$

La transformada de Fourier es una herramienta matemática ampliamente utilizada para realizar el análisis espectral y convertir una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia [6]. El muestreo es un proceso en el que se toman muestras de una señal en intervalos de tiempo regulares para crear una señal discreta. El teorema de muestreo de Nyquist establece que una señal continua puede ser completamente reconstruida a partir de sus muestras si la frecuencia de muestreo es al menos el doble de la frecuencia máxima presente en la señal [5].

4.2. Sistemas de adquisición de datos

Un sistema de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés) nos permite la recolección, almacenamiento y el análisis de datos obtenidos a través de sensores, señales analógicas, dispositivos electrónicos y otros instrumentos digitales en una unidad de procesamiento de datos como una computadora [7]. Un sistema de adquisición de datos suele tener varios elementos como convertidores analógico-digitales (ADC), sistemas de muestreo y almacenamiento de datos, software, procesamiento y análisis de datos. Uno de los procesos más críticos en una DAQ, este determinara la calidad de los datos obtenidos [8].

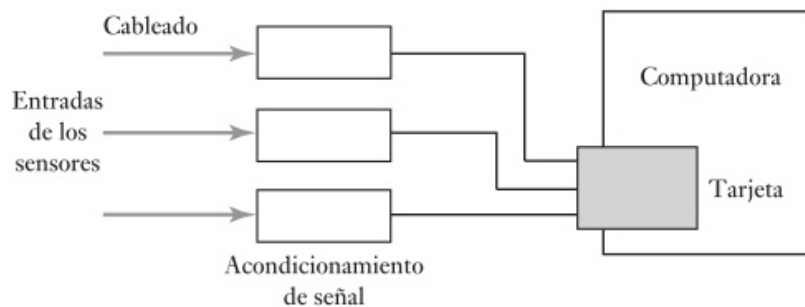


Fig. 1 Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos [9]

El muestreo es un proceso mediante el cual se toman muestras de una señal analógica a intervalos regulares de tiempo para crear una señal digital discreta. La frecuencia de muestreo es la cantidad de muestras que se toman de una señal en unidad de tiempo, se mide en muestras por segundo o en Hertz (Hz). Utilizar una frecuencia de muestreo adecuada es de suma importancia para poder obtener todos los datos importantes de una señal [10]. Una buena frecuencia de muestreo nos permitirá evitar el aliasing creado cuando no se cumple el teorema de Nyquist como se muestra

en la figura 2, donde la condición de Nyquist es que la frecuencia de la señal muestreada sea menor a dos veces la señal de muestreo ($f_s < 2f_m$).

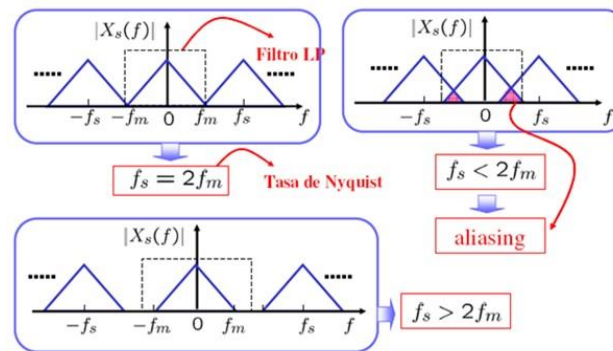


Fig. 2 Aliasing en muestreo de señales [11]

Como se muestra en la figura 2, otro de los aspectos importantes es el acondicionamiento de señal, en el cual se tiene que llevar la señal de entrada a un nivel o proceso en el que tarjeta de procesamiento pueda interpretar los datos, ya que las señales del mundo real a menudo requieren ser amplificadas, filtradas o modificadas de alguna manera antes de ser muestreadas y digitalizadas [5,6]. Los acondicionadores de señal, como amplificadores, filtros y convertidores, se utilizan para mejorar la calidad de la señal y adaptarla a los requisitos de los convertidores analógico-digitales.

Los convertidores analógico-digitales transforman las señales analógicas en una representación digital discreta con la cual los sistemas digitales pueden procesar, uno de los factores importantes en un ADC es la resolución que nos puede proporcionar, ya que esta determinará la precisión y la calidad de la señal digitalizada [6]. La resolución se define como el número de niveles discretos en los que se puede dividir el rango de la señal analógica y se mide en bits.

4.3. *Modulación y demodulación*

La modulación consiste en variar alguna propiedad de una señal portadora, como la amplitud, la frecuencia o la fase; en función de una señal moduladora que contiene la información a transmitir. La demodulación es el proceso inverso, en el cual se extrae la información de la señal modulada [12]. Existen diferentes técnicas de modulación y demodulación, que se pueden clasificar en modulación analógica y modulación digital. En la modulación analógica, la señal moduladora es una señal analógica continua, mientras que, en la modulación digital, la señal moduladora es una secuencia discreta de símbolos o bits [13]. Las técnicas de modulación analógica son la modulación de amplitud (AM), la modulación de frecuencia (FM) y la modulación de fase (PM). Estas técnicas varían la amplitud, la frecuencia y la fase de la señal portadora, respectivamente [14]. Por otro lado, las técnicas de modulación digital comprenden la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) y la modulación por desplazamiento de fase (PSK). Estas técnicas varían la amplitud, la frecuencia y la fase de la señal portadora, respectivamente [15]. Las técnicas de demodulación correspondientes a cada método de modulación también varían, e incluyen demoduladores coherentes y no coherentes, así como demoduladores síncronos y asíncronos [16]. El análisis y la comprensión de las técnicas de modulación y demodulación también pueden ser útiles en trabajos futuros relacionados al del presente documento, ya que se trabaja con sensores de color y frecuencias de salida. La modulación y demodulación de señales pueden ser aplicadas para transmitir y recibir información sobre los componentes de color RGB en aplicaciones de procesamiento de imágenes y visión artificial, entre otras.

4.4. *Control y estabilización de frecuencia*

El control y la estabilización de frecuencia son aspectos críticos en el diseño y la operación de circuito, ya que la precisión y la estabilidad de frecuencia pueden afectar significativamente el rendimiento y la confiabilidad de los sistemas [17]. En este contexto, es importante considerar diferentes técnicas y componentes utilizados para lograr el control y la estabilización de frecuencia. Uno de los componentes más comunes utilizados para controlar y estabilizar la frecuencia en sistemas electrónicos es el oscilador. Los osciladores son dispositivos electrónicos que generan una señal periódica de una frecuencia específica, y se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como relojes de tiempo, sistemas de comunicaciones y sistemas de control. Existen diferentes tipos de osciladores, como osciladores de cristal y osciladores de cerámica, cada uno con sus propias características y aplicaciones [18].

El control y la estabilización de la frecuencia también pueden lograrse mediante el uso de circuitos de control, como los controladores de fase y los controladores de frecuencia. Los controladores de fase, también conocidos como Phase Locked Loops (PLL), son sistemas de control de retroalimentación que pueden sincronizar la fase y la frecuencia de una señal con la de una señal de referencia [19], en la figura 3 se encuentra el diagrama básico de un PLL, en él podemos observar la señal de entrada, la cual es procesada por el detector de fase; posteriormente se procesa por un filtro pasa bajas, esta señal se amplifica a la salida del amplificador, la cual es la salida del sistema y se utiliza como retroalimentación del sistema hacia el bloque detector de fase. Los controladores de frecuencia, por otro lado, ajustan la frecuencia de una señal en función de una señal de control o de una señal de error, lo que permite mantener la frecuencia dentro de un rango de tolerancia específico [20]. Además, el control y la estabilización de la frecuencia también pueden depender de la selección adecuada de componentes y la implementación de técnicas de diseño,

como la selección de componentes con coeficientes de temperatura bajos, el uso de técnicas de montaje en superficie y el empleo de técnicas de blindaje electromagnético [21].

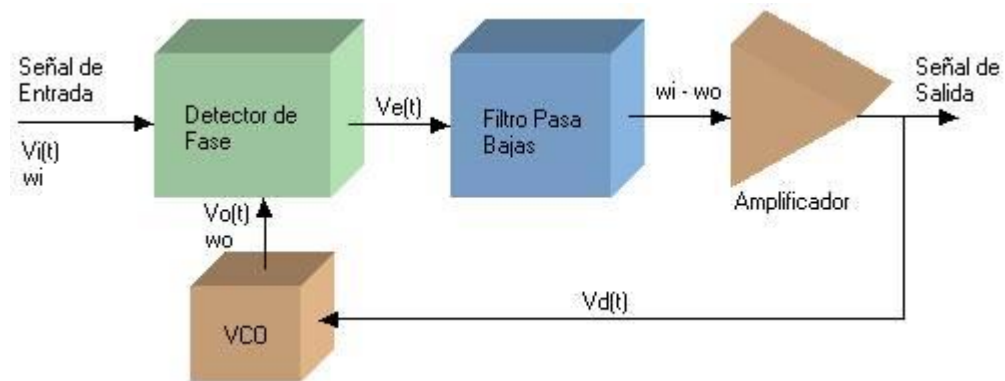


Fig. 3 Diagrama básico en bloques de un PLL. [22].

4.5. Fundamentos y teoría del color

El color es la interacción entre un pequeño rango de ondas electromagnéticas, el ojo y el cerebro de una persona [23], la teoría de color es un campo multidisciplinario, representado y utilizado en diferentes contextos [24]. Es de suma importancia el entendimiento de los sistemas de medición de control y control de color, como el sensor de TCS320.

Los colores visibles corresponden al espectro electromagnético, denominado espectro de luz visible, el cual se encuentra aproximadamente entre los 400 y 700 nm [23]. En la figura 4 se encuentran representados los diferentes colores para las diferentes longitudes de onda y también se observa que el ojo humano solo puede observar una pequeña parte de todo el espectro electromagnético, existe un amplio rango de longitudes de onda, las cuales no son visibles para el ojo humano.

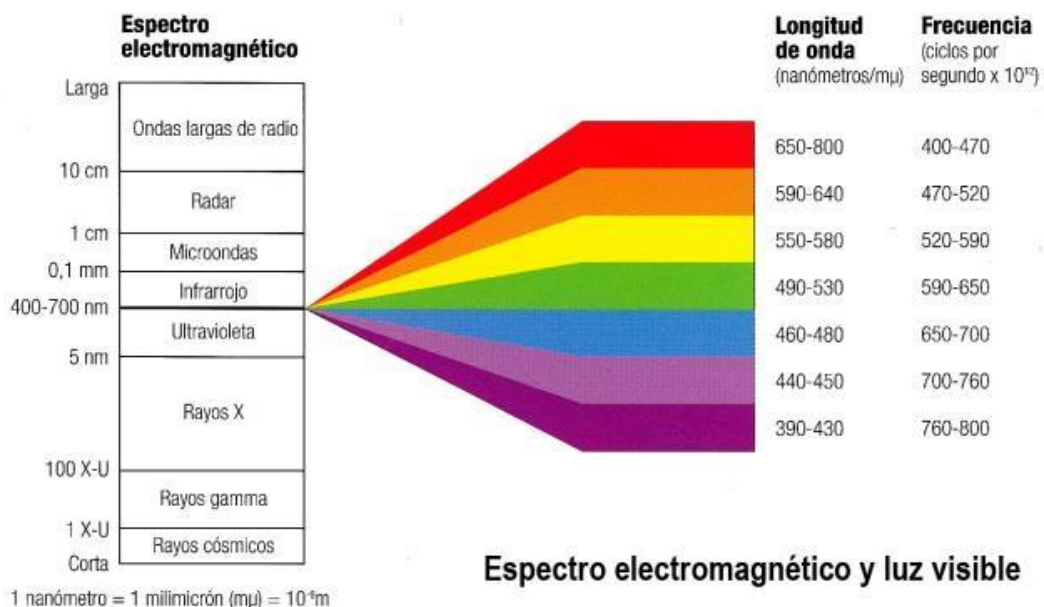


Fig. 4 Espectro electromagnético y longitudes de onda para la luz visible [25].

Una de las bases de la teoría del color es el modelo de color, que es una representación matemática y abstracta de los colores en un espacio tridimensional. Existen diferentes modelos de color, como el modelo RGB (Red, Green, Blue), el modelo CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black) y el modelo HSL (Hue, Saturation, Lightness), cada uno con sus propias características y aplicaciones [26]. El modelo RGB es especialmente relevante para el presente trabajo, ya que el sensor de color TCS3200 está diseñado para medir los componentes RGB del objeto bajo prueba.

Un aspecto fundamental que considerar es la percepción del color, esto se refiere a como los humanos perciben y procesan los colores por medio del sistema visual mostrado en la figura 5, la luz entra por la parte frontal del ojo a través del lente y es enfocada hacia la retina en la parte trasera del ojo, ahí se encuentra los denominados bastones y conos, estos contienen pigmentos, los pigmentos alojados en los bastones y conos son sensibles a las luz visible y pasan esta información al nervio óptico [23] , existen alrededor de 100 millones de bastones pero solo 5 millones de conos en el ojo humano; los conos son menos sensitivos pero son más rápidos que los bastones [27], los conos permiten a los humanos distinguir los colores y los altos niveles de luminiscencia denominado visión fotópica [23].

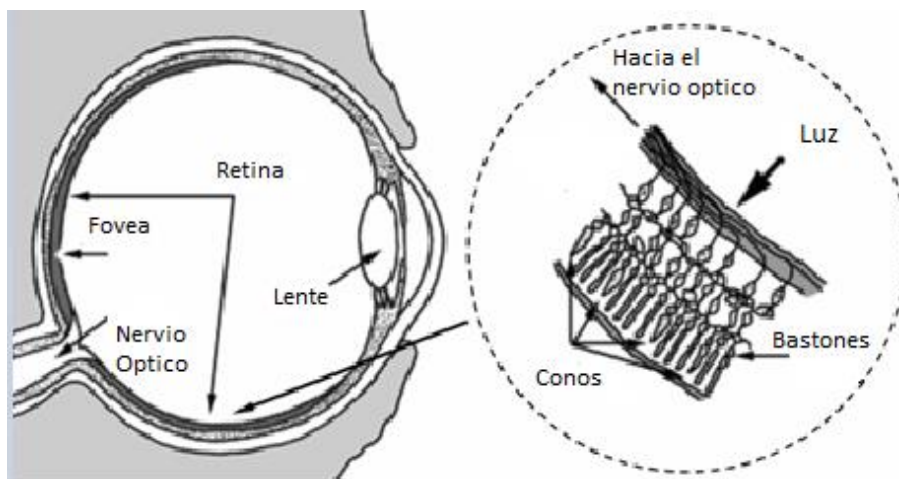


Fig. 5 Ojo huma y retina [23]

Los bastones son óptimos a bajos niveles de luminiscencia denominada visión escotópica, estos proveen al cerebro información acerca de la luz y oscuridad [23]. Los términos escotópicos y fotópico son explicados en el artículo [27], en figura 6 se muestra una gráfica de ambos niveles de visión.

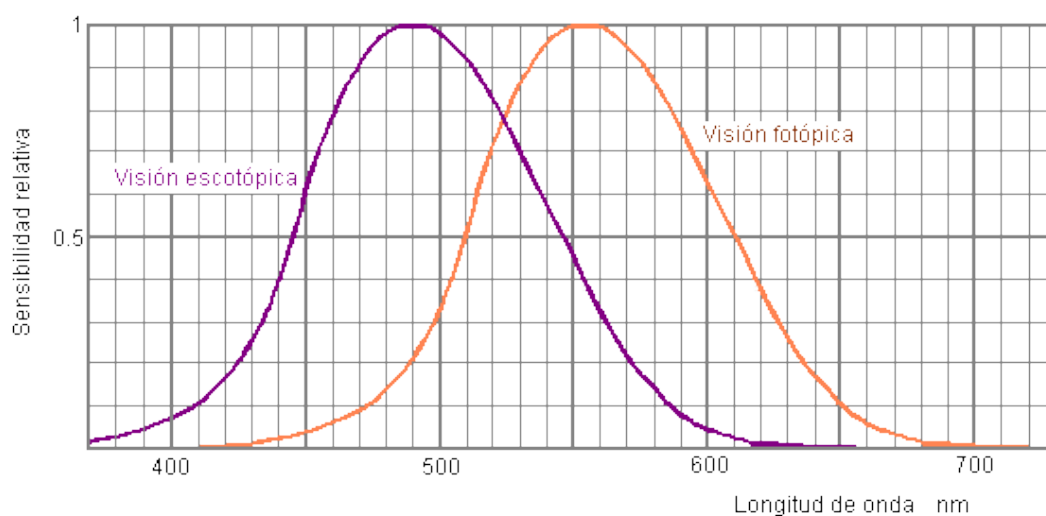


Figura 6. Curvas de sensibilidad del ojo [28]

La percepción del color está influenciada por factores como la iluminación, el contraste, el entorno y la adaptación cromática [29].

El estudio de la percepción del color puede ser útil para comprender las limitaciones y desafíos asociados con la medición y la representación de los colores en sistemas electrónicos y de procesamiento de imágenes. Además, la teoría del color también aborda la representación y la codificación de los colores en sistemas digitales, como el uso de sistemas de coordenadas de color, la cuantización y la compresión de colores [30].

4.6. *Sensores con salida en frecuencia*

En los sistemas actuales de medición, la respuesta y el tiempo de procesamiento son de suma importancia, la ventaja de usar un sensor con salida en frecuencia contra los sensores con salidas tradicionales voltaje o corriente se encuentran en las propiedades de la frecuencia que podemos utilizar, la lectura de esta frecuencia puede ser un proceso más tardado que la recolección de datos de voltaje con la cual se podría utilizar un dispositivo ADC para que el dispositivo de control pueda interpretar la señales medidas por el sensor, a cambio de esto la señal de frecuencia tendría que ser procesada mediante otros métodos, pero como veremos a continuación, si la aplicación amerita utilizar alguna de las ventajas de la salida en frecuencia puede ser una buena opción utilizar un sensor con salida en frecuencia.

4.6.1. VENTAJAS DE LOS SENSORES CON SALIDA EN FRECUENCIA

Los siguientes puntos fueron tomados del artículo [31] donde se habla de las ventajas de los sensores con salida en frecuencia sobre los sensores con salida en voltaje.

- Alta inmunidad al ruido

Esta es una propiedad que es inherente de la modulación en frecuencia, estas señales pueden ser transmitidas por largas distancias más que las señales analógicas o digitales y no necesitan una sincronización como las digitales, esta salida en frecuencia es equivalente a tener una señal digital serie, el voltaje es inherentemente vulnerable a las fuentes de ruido que se encuentran acopladas a nuestra señal de interés, por las razones anteriormente mencionadas los FDS son buenos para aplicaciones donde se tenga un ambiente susceptible a ruido o también aplicaciones a larga distancia.

- Amplio rango dinámico

A diferencia de las señales de voltaje, las señales en frecuencia no están limitadas por la fuente de alimentación, las señales en frecuencia cuentan con un amplio rango lo cual nos permite tener más información, un rango de 100 dB puede ser fácilmente obtenido con un FDS.

- Alta precisión

Una referencia de frecuencia suele ser más estable que una de voltaje, un ejemplo de una referencia de frecuencia es un cristal oscilador.

- Simplicidad de integración y codificación de señales

La integral precisa del tiempo de la señal de salida de los sensores de frecuencia es fácil de implementar, El contador/sumador de pulsos es un integrador ideal que puede operar por un tiempo ilimitado, además la señal de frecuencia puede ser procesada por microcontroladores con circuitos que hagan una interfaz adicional. Estos no necesitan un convertidor A/D como en el caso de los sensores análogos, haciendo que se reduzcan los costos del sistema.

- Simplicidad de la señal para la multiplexión

Los multiplexores para los sensores en frecuencia son más sencillos de realizar y no producen los errores que pueden ocurrir en los multiplexores analógicos en los cuales las resistencias transitorias y el channel crosstalk producen errores, estos pueden ser corregidos usando señales diferenciales, pero esto conduce a diseños más complejos.

4.6.2. DESVENTAJAS DE LOS SENSORES CON SALIDA EN FRECUENCIA

También es necesario mencionar las desventajas o los puntos negativos de utilizar estos sensores, como observamos en los puntos anteriores con este tipos de sensores tenemos las ventajas de una señal en el dominio de la frecuencia, que han sido altamente utilizadas en las comunicaciones por dichas razones, pero una de las desventajas es precisamente el cómo interpretar los datos obtenidos, ya que hay que tener ciertos conocimientos en el análisis de señales para poder detectar errores y mediciones correctas, así como los métodos de conversión de frecuencia a digital no son algo trivial, algunos métodos clásicos (standard counting, technique, indirect counting and its combination) no pueden ser utilizados e algunos sensores modernos porque no dan la precisión en todo el rango de frecuencias [31].

Además, en los métodos de conversión más avanzados es necesario comprar una licencia a sus autores y la mayoría de ellos no proporcionan la velocidad necesaria. Afortunadamente, se ha logrado tener un progreso en la microelectrónica y la Asociación Internacional de Sensores de Frecuencia (IFSA) ha hecho una posibilidad de utilizar sensores y transductores de salida de frecuencia como estándar, sensores y transductores de salida de voltaje con ADC para producir una salida digital y utilizarla en diferentes sistemas de sensores [31].

4.7. Sensores de color y sus aplicaciones

El color es una característica que tienen los objetos, cada uno de estos absorbe una cantidad de energía; esto depende de la estructura molecular de estos mismos. El ojo humano puede percibir estas ondas electromagnéticas solamente si se encuentran entre los 400 y 700nm [23] mencionado en el capítulo 4.5. Los sensores de color son dispositivos electrónicos que se utilizan para detectar y medir la intensidad de los componentes de color en una fuente de luz o en una superficie iluminada. La figura 7 ilustra como se lleva a cabo la detección de color, las longitudes de onda reflejadas por el objeto puesto a medición son las que recibe el receptor de nuestro sensor de color.

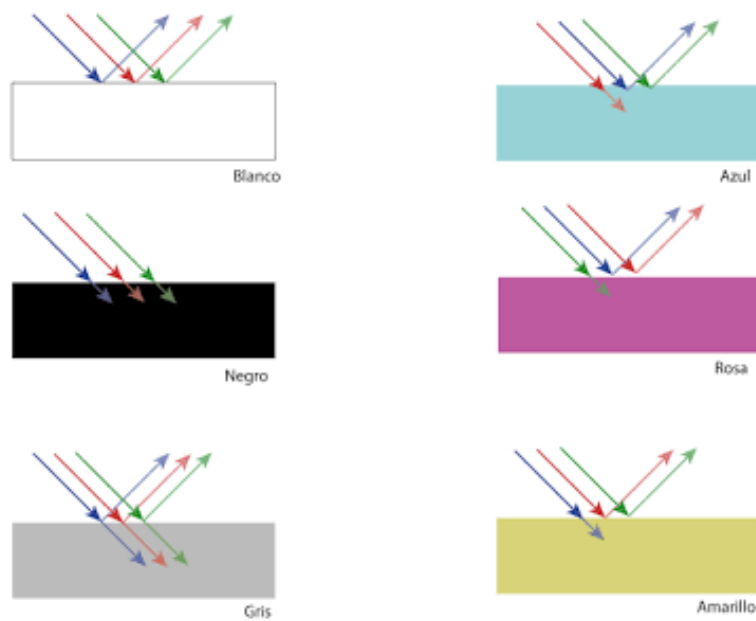


Fig. 7 Reflexión de la luz en los objetos [32]

Estos sensores se han implementado en una amplia variedad de aplicaciones en diferentes campos, como la visión artificial, la iluminación y la monitorización de

la calidad del agua [33]. El sensor de color TCS3200 es un dispositivo basado en un arreglo de fotodiodos y filtros de color que pueden medir la intensidad de los componentes rojo, verde y azul (RGB) de la luz incidente [34]. El sensor utiliza un método de conteo de periodos para convertir la intensidad de los componentes de color en señales de frecuencia, lo que facilita su procesamiento y análisis en sistemas digitales y de procesamiento de imágenes.

Los sensores de color como el TCS3200 tienen una amplia gama de aplicaciones; algunas de las aplicaciones más comunes incluyen:

- **Visión artificial.** Los sensores de color se utilizan en sistemas de visión artificial para identificar y clasificar objetos según su color, lo que es útil en aplicaciones como la inspección de productos y el control de calidad [35].
- **Iluminación y control de ambientes.** Los sensores de color pueden utilizarse para monitorear y controlar la iluminación en entornos como oficinas, hogares y espacios públicos, adaptando la intensidad y el espectro de color de la luz para mejorar la comodidad y la eficiencia energética [36].
- **Agricultura y horticultura.** Los sensores de color pueden ser utilizados para monitorizar el estado de salud de las plantas y el suelo, detectando cambios en la coloración de las hojas o la composición del suelo que pueden indicar problemas como la falta de nutrientes o el estrés hídrico [36].
- **Monitorización de la calidad del agua.** Los sensores de color pueden ser utilizados para medir la concentración de sustancias químicas y biológicas en el agua, como algas, contaminantes y sedimentos, lo que es útil en aplicaciones de control de la calidad del agua y la protección del medio ambiente [36].

4.8. Descripción y funcionamiento del sensor TCS3200

El sensor de color TCS3200 es un dispositivo electrónico que se utiliza para medir la intensidad de los componentes de color rojo, verde y azul (RGB) de una fuente de luz o en una superficie iluminada. Este sensor es fabricado por TAOS Inc. y se caracteriza por su capacidad de convertir la intensidad de luz en señales de frecuencia [34].

El TCS3200 consiste en un arreglo de 64 fotodiodos dispuestos en una matriz de 8x8, en la que cada fotodiodo está cubierto por un filtro de color (rojo, verde, azul o transparente). La disposición de los filtros de color en la matriz es tal que hay 16 fotodiodos para cada color y 16 fotodiodos transparentes. Esta configuración permite al sensor medir la intensidad de la luz en los tres colores primarios y también la intensidad total de la luz [34], el diagrama de bloques básico funcional del sensor TCS3200 se muestra en la figura 8.

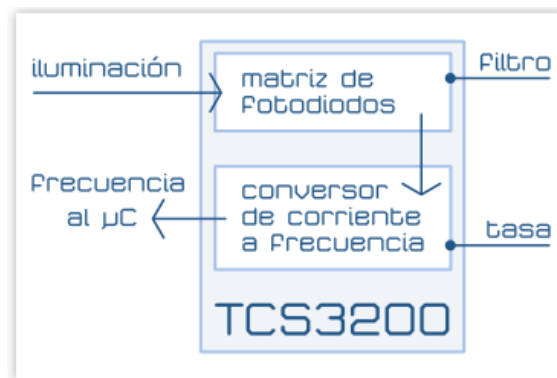


Fig. 8 Diagrama de bloques básico del sensor TCS3200 [37].

El sensor TCS3200 utiliza un oscilador interno para generar una señal de reloj, que controla el tiempo de integración de la luz en los fotodiodos y la frecuencia de salida de las señales de color. La frecuencia de salida es proporcional a la intensidad de la luz incidente en los fotodiodos, de modo que se obtiene una señal de frecuencia variable en función de la intensidad de la luz para cada componente de color [34,38].

El TCS3200 también incluye un conjunto de entradas de control denominadas S0, S1, S2 Y S3 para seleccionar los fotodiodos activos y configurar la frecuencia de salida. Esto permite al usuario adaptar el funcionamiento del sensor a las condiciones específicas de la aplicación y optimizar la precisión y la sensibilidad de las mediciones de color [34], en la tabla 1 se muestran las diferentes configuraciones que se pueden lograr con el sensor TCS3200, con las entradas S0 y S1 controlaremos el escalamiento de la frecuencia y con las entradas S2 y S3 el tipo de fotodiodo con el que queremos realizar la lectura.

Tabla 1

Entradas de control para el sensor TCS3200 [34]

So	S1	Escalamiento de la frecuencia de salida f_0	S2	S3	Tipo de fotodiodo
Bajo	Bajo	Apagado	Bajo	Bajo	Rojo
Bajo	Alto	2%	Bajo	Alto	Azul
Alto	Bajo	20%	Alto	Bajo	Sin filtro
Alto	Alto	100%	Alto	Alto	Verde

El sensor TCS3200 ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones de medición de color en la industria, la investigación y la enseñanza; algunas de estas aplicaciones incluyen la calibración y el control de la calidad en la producción de pantallas de visualización, la detección y clasificación de objetos por color en sistemas de visión artificial y la medición de parámetros ópticos en experimentos de óptica y espectroscopia [34].

4.9. *Estabilidad y precisión en la medición de componentes de color*

La estabilidad y precisión son factores que influyen directamente en la calidad y confiabilidad de las mediciones de color y en el rendimiento general de un sistema. La precisión en la medición de componentes de color se refiere a la capacidad del sistema de medición para proporcionar resultados consistentes y cercanos al valor real de las componentes de color. Diferentes factores pueden afectar la precisión de las mediciones, incluyendo la resolución y el ruido del sistema de medición, la calidad de la fuente de luz y la calibración del sensor de color [26, 39].

La estabilidad en la medición de componentes de color se refiere a la capacidad del sistema de medición para mantener una precisión constante a lo largo del tiempo y en diferentes condiciones ambientales. La estabilidad puede verse afectada por factores como la deriva térmica y la variabilidad en la fuente de alimentación, así como por el envejecimiento y la degradación de los componentes del sistema de medición, incluido el sensor de color [26]. Para asegurar la estabilidad en la medición de componentes de color, es necesario implementar técnicas y circuitos de control y estabilización de la frecuencia, como el uso de osciladores de cristal y circuitos de regulación de voltaje [17,40].

4.10. Medición de frecuencia mediante el método de correspondencia de pulsos

La técnica de medición de frecuencia basada en la correspondencia de pulsos implica contar la cantidad total de ciclos completos de dos series de pulsos. Se utiliza un punto de referencia en el que los semiciclos positivos de ambas señales coinciden simultáneamente y se registra el recuento de cada señal en cada nueva coincidencia que ocurra. Una de las señales es conocida (f_o), de modo que su período (T_o) se emplea como referencia para calcular el período de la segunda señal desconocida (T_x) y su valor de frecuencia (f_x). En este enfoque, la relación entre los períodos de las señales f_o y f_x se determina mediante la comparación de los intervalos de tiempo $N_o(i)T_o$ y $N_x(i)T_x$, donde $N_o(i)$ y $N_x(i)$ representan el número de ciclos completos para la i -ésima coincidencia de T_o y T_x , respectivamente [41]. Un criterio preestablecido para finalizar la medición es que $N_x(i)$ para una coincidencia específica tome la forma de T_o , donde r es un número entero; en ese caso, $N_x(i)$ adoptará la forma del período desconocido [42], el periodo de la señal desconocida se puede obtener con la ecuación 3 donde se debe cumplir la siguiente condición $T_x - 2t < x < T_x + 2t$ [41], donde t es el ancho de pulso de las señales.

$$T_x = (N_o * t_0) / N_x \quad (3)$$

5. DESARROLLO, DISEÑO EXPERIMENTO

La metodología implementada se basa en la búsqueda e iteración de mediciones, las cuales nos permiten llegar a la conclusión deseada. En la figura 9 se encuentra un diagrama de flujo de las mediciones realizadas, se realizó este proceso de medición con el contador de frecuencia comercial Agilent 53131a y con el contador de pulsos experimental de la figura 13; una vez obtenida la información de ambos sistemas, se guardaron los datos para poder ser analizados posteriormente.

Este sensor nos permite tener diferentes escalas de frecuencia y en cada medición de color RGB se utilizó cada uno de los filtros, esto con la finalidad de obtener una medición completa de cada muestra, para realizar esto fue necesario realizar las combinaciones de las entradas del sensor S2 y S3, véase la tabla 1.

La escala en frecuencia se utiliza para incrementar la resolución del sensor o maximizarla ante los cambios de la luz [34]. Como se muestra en la tabla 1 existen diferentes combinaciones para activar las escalas de frecuencia del sensor, en nuestro experimento se dejó fijo este valor al 20%.

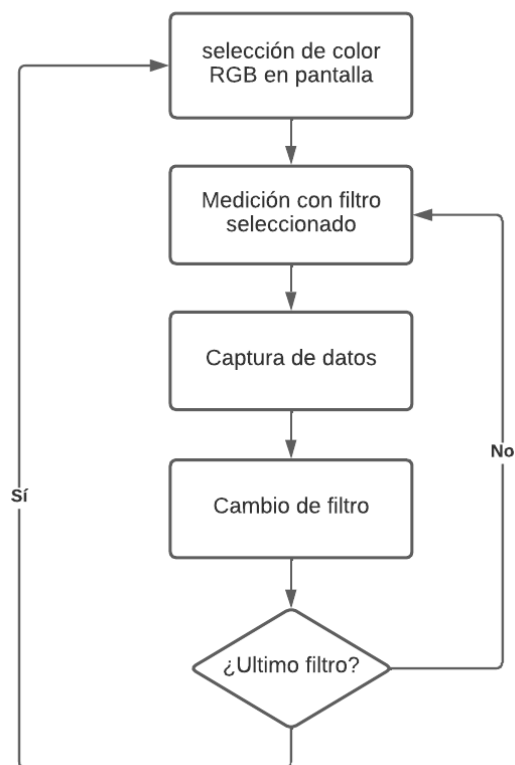


Fig. 9. Iteraciones en mediciones con diferentes filtros del sensor TCS3200.

5.1. Sistema de configuración y posicionamiento del sensor TCS3200

Se utilizó una pantalla TFT como fuente controlada de color para medición, también se utilizó un Microcontrolador Arduino Uno para controlar la pantalla TFT. Este microcontrolador es el encargado de cambiar los colores de la pantalla, así como de controlar las entradas de configuración del Sensor TCS3200, por medio de este sistema podemos controlar los diferentes parámetros de interés del sensor.

Fue necesario utilizar una impresión 3D para mantener a nuestro sensor en la misma posición en todas las lecturas, así como prevenir que entrara luz externa al sistema que pueda agregar ruido, esta impresión 3D ayudó a aumentar la estabilidad de nuestras mediciones. En la figura 10 se encuentra el modelo de esta impresión. El sensor debe ajustarse en la parte superior y la pantalla en la parte inferior en la figura 13 se muestra el sensor instalado en la impresión 3D.

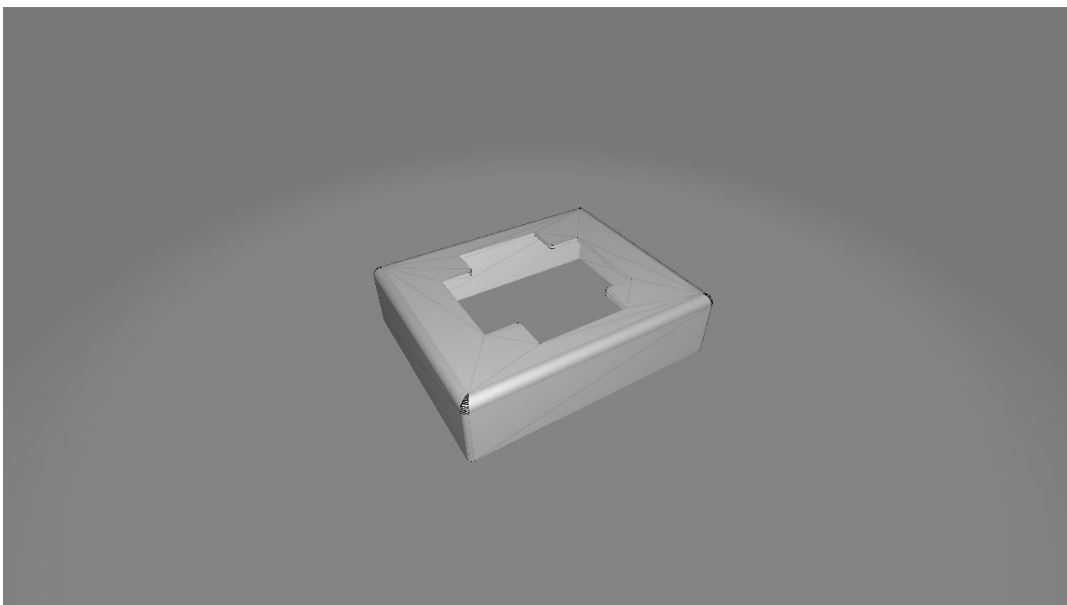


Fig. 10 Impresión 3D para fijar el sensor TCS3200

5.2. Placa de circuito impreso

En la figura 11 se muestra el diagrama de conexiones del circuito de prueba, en este se encuentran conectados los dispositivos necesarios para el experimento, en la parte superior izquierda se encuentran las conexiones hacia el Arduino que controla la pantalla, misma que tiene sus terminales en la parte superior derecha.

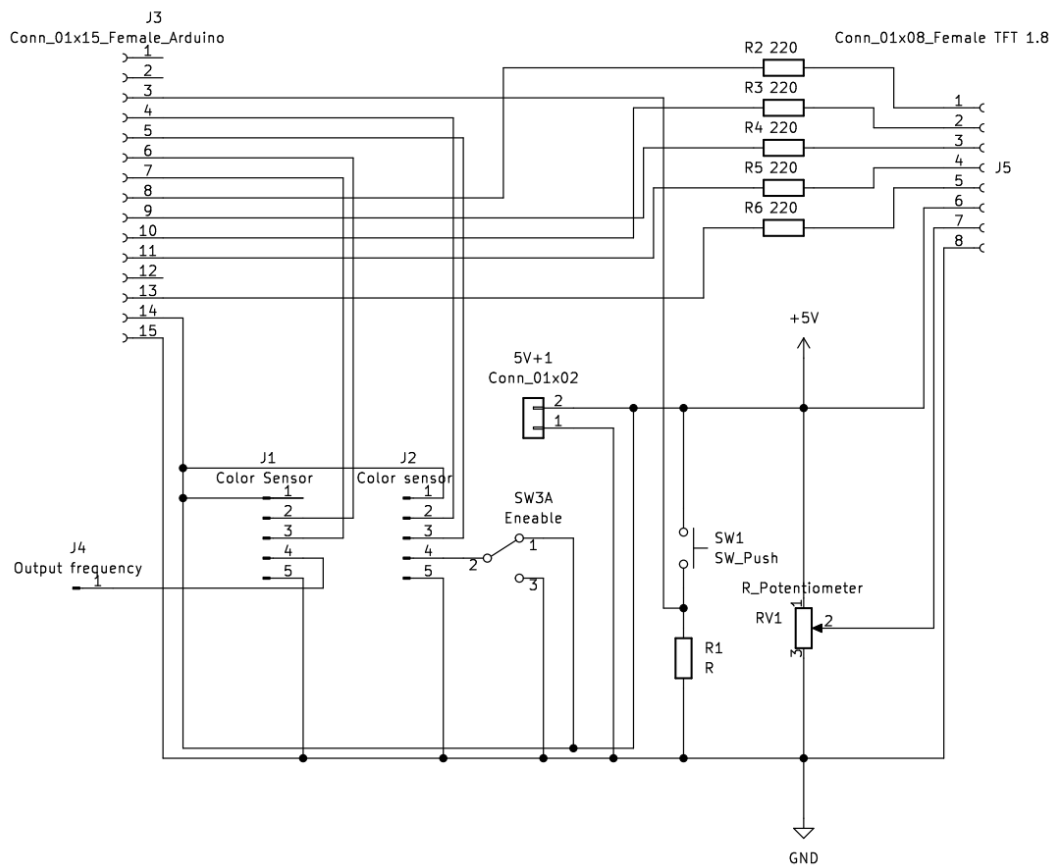


Fig. 11 Diagrama de conexiones del circuito impreso.

El sensor de color se encuentra conectado a un interruptor que permite accionar los leds que tiene incluido el módulo TCS3200, cuatro terminales del sensor están conectadas a el microcontrolador para intercambiar entre los diferentes filtros del

sensor, y en la terminal J4 se encuentra la salida del sensor por donde obtendremos las mediciones. Asimismo, se le agregaron resistencias a las conexiones de la pantalla para reducir la corriente, el potenciómetro RV1 controla la intensidad de luz de la pantalla.

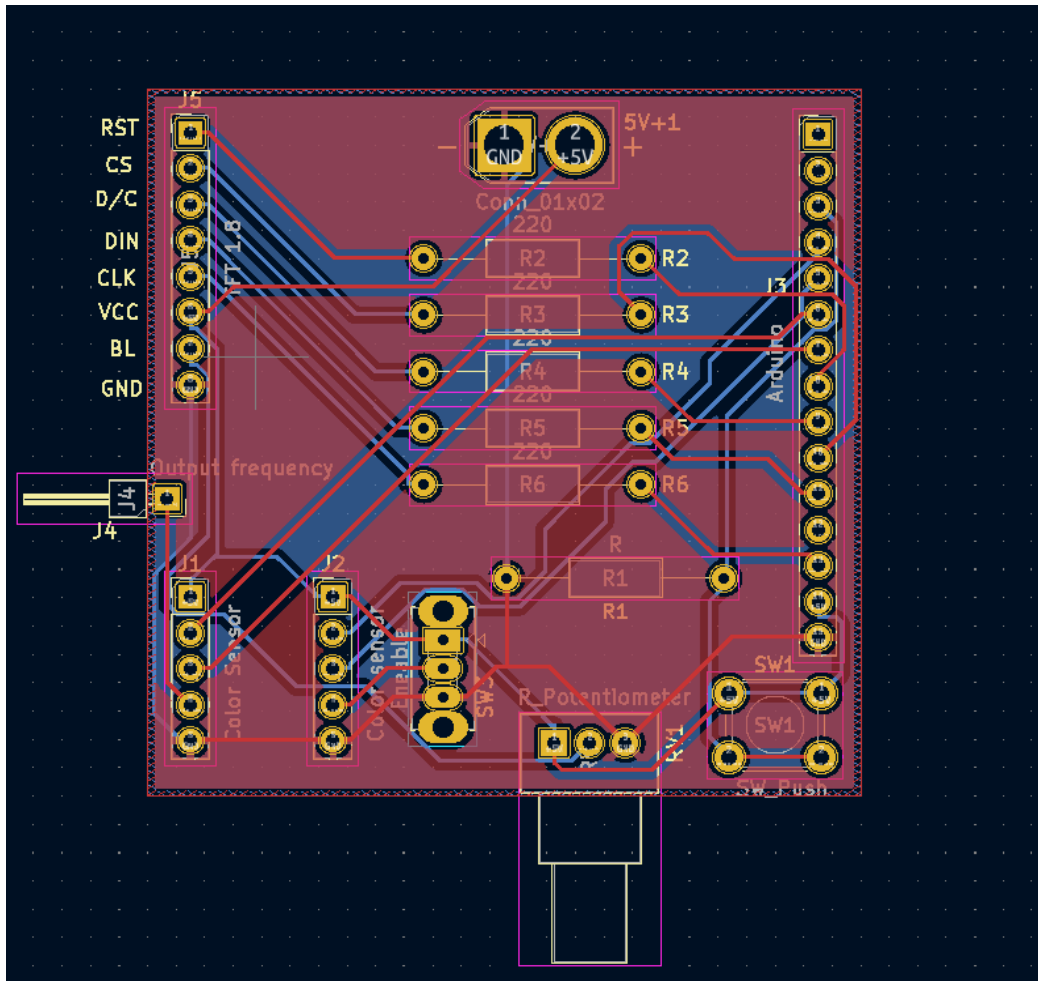


Fig. 12 Placa de circuito impreso

El esquema del circuito impreso que se muestra en la figura 11 es el utilizado en el experimento, que consta de las conexiones del esquemático de la figura 10, este circuito impreso se realizó a dos caras, para mejorar la estabilidad ante el ruido eléctrico, se rellenaron todos los espacios entre conexiones a tierra.

5.3. Sistema de medición

Los diferentes componentes se encuentran unidos a través de la placa PCB, que permite su comunicación, de esta manera el microcontrolador puede controlar filtros del sensor y la pantalla, con la impresión en 3D no permitimos que luz externa entre a nuestro experimento mejorando la calidad de la medición, de este sistema ya podemos obtener la frecuencia del sensor.

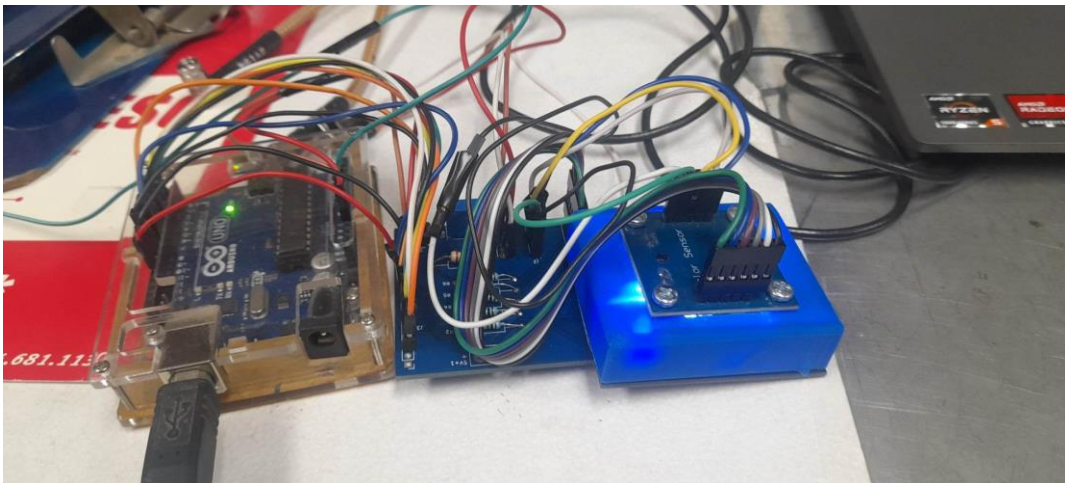


Fig. 13. Placa de circuito impreso donde se unen el sensor de color TSC3200 y el modelo 3D para dar más estabilidad a la señal.

La salida del circuito impreso está unida la salida en frecuencia del sensor TCS3200, la cual fue conectada a el contador de pulsos, el cual fue mostrado en el artículo [41], estas coincidencias son almacenadas en un ordenador donde posteriormente los datos son procesados y se obtiene la frecuencia del sensor, también esta salida fue conectada al contador comercial Agilent 513131a.

La salida del sensor es una onda cuadrada, por lo cual no es necesario un acondicionamiento de tipo de señal antes de ingresarla a el contador de

coincidencias, pero la señal de salida del sensor tuvo que ser modificada en el ancho de pulso ya que el sensor tiene un ancho de pulso del 50% del periodo [34], esto provoca que en algunas frecuencias de trabajo se presente más de una coincidencia para un solo periodo del sensor, por lo que esta señal tuvo que ser modificada con la compuerta 74LS123 para obtener un ancho de pulso menor y evitar incertidumbre en la obtención de la frecuencia.

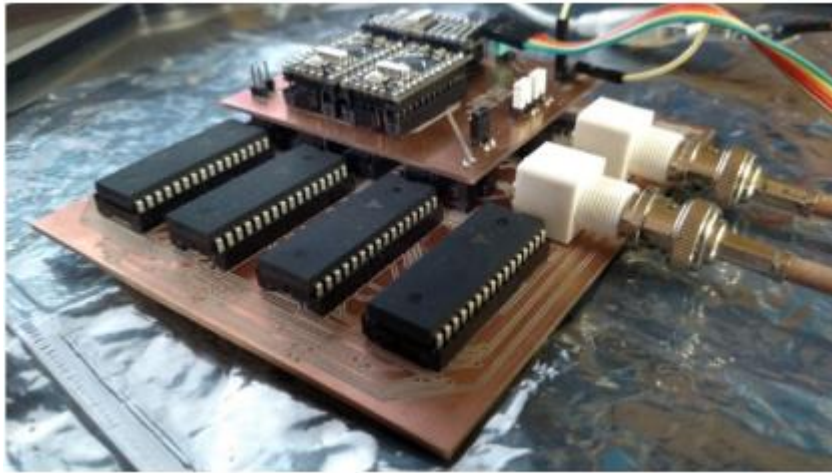


Figura 14. Circuito contador de coincidencias [43].

5.4. Experimento

Se realizó la medición de cinco colores seleccionados en el sistema RGB (255-255-55), (0, 0, 0) (255-0-0), (0-255-0), (0-0-255) los cuales forman los colores negro, blanco, rojo, verde y azul cada uno de estos colores se programó en la pantalla y se capturaron las mediciones de la frecuencia de salida del sensor TCS3200.

Respecto a las entradas del sensor, no hubo cambios en la escala de frecuencia; todas las mediciones se realizaron con una escala del 20%, esto se lleva a cabo manteniendo la entrada del sensor S0 en alto y S1 en bajo; las entradas S2 Y S3 del sensor de color se utilizaron para cambiar los filtros que el sensor tiene integrados en cada medición, estos parámetros de configuración se pueden observar en la tabla 1.

La intensidad de la pantalla no fue modificada tampoco la distancia entre el sensor con respecto a la pantalla. El código utilizado para configurar el sensor TSC3200 por medio de Arduino se encuentra en el anexo 1, el filtro 1 corresponde a los fotodiodos del tipo rojo, el filtro 2 a los fotodiodos del tipo verde, el filtro 3 a los fotodiodos del tipo azul y el filtro 4 se refiere a la configuración sin filtro, en las tablas mostradas en la sección de resultados se hace referencia a estas configuraciones.

Las mediciones fueron comparadas con el contador de frecuencia comercial Agilent 53131a el cual ofrece 10 dígitos de resolución y un ancho de banda de 225Mhz [44], este funciona como estándar con el cual comparar los resultados obtenidos con el contador de coincidencias utilizado.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y METODOLOGÍA

Se realizaron mediciones de diferentes colores RGB mostrados en la pantalla al sensor de color, con el circuito experimental y el contador de frecuencia comercial en las siguientes tablas se muestran las mediciones obtenidas para los colores RGB (255,255,255), (0,0,0), (255,0,0), (0,255,0), (0,0,255), las mediciones se tomaron con el contador comercial Agilent 53131a y el contador de pulsos mencionados anteriormente. A continuación, se muestra el resultado de las mediciones, se tomaron los valores de la frecuencia mínima, frecuencia máxima, diferencial mínimo y máximo entre medición y el promedio de todas las mediciones en ambos dispositivos para cada filtro del sensor de color TCS3200, En el anexo 2 se muestran las mediciones tomadas con el contador de frecuencia Agilent 531a y en el anexo 3 se muestran las mediciones del contador de pulsos experimental, todos los valores de las tablas se encuentran en Hz a excepción del error relativo que se muestra en porcentaje.

Tabla 2
Resultados de mediciones RGB (255,255,255) con contador Agilent 53131a

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	658.1509	822.421728	1056.1663	2381.796
Frecuencia máxima	659.30692	829.803519	1058.9105	2508.4023
ΔMin	0.007128	0.004467	0.004467	0.0494571
ΔMax	6.196912	6.196912	1.778693	69.882533
Promedio	658.91545	823.9753459	1057.8494	2482.1071

Tabla 3
Medición RGB (255,255,255) en circuito Contador de pulsos Experimental y error relativo

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	646.29285	800	1000	2545.4545
Frecuencia máxima	2000	828.5714286	1025.641	2666.6667
Δ Min	0.0307089	0.03566788	0.2868617	0.0708006
Δ Max	1333.3333	27.5862069	1023.8095	121.21212
Promedio	650.71612	827.9403976	1020.8198	2574.064
Error relativo	1.26%	0.48%	3.63%	3.57%

Tabla 4
Comparación de cambios en frecuencia en medición RGB (255,0,0) de ambos dispositivos.

	Contador de pulsos	Agilent 53131a
Δ Min	0.0307089	0.004467
Δ Max	1333.3333	69.882533

En la tabla 2 se pueden observar los valores de medición obtenidos por el medidor de frecuencia Agilent, en el filtro 4 se puede observar una diferencia de 126.6063 Hz entre la frecuencia máxima y mínima, de los cuatro filtros medidos en este color esta es la diferencia más grande y también el valor de frecuencia mas alto donde se observó menor estabilidad en las mediciones.

En la tabla 3, la cual nos representa los valores del contador de coincidencias experimental se puede observar diferencias más significativas entre el mayor y menor valor de frecuencia; esto se debe al primer valor que se obtiene en las coincidencias ya que es el que tiene el mayor error y depende mucho de la fase de ambas señales [45]; en el anexo 7 se muestran las mediciones obtenidas con el contador, ahí se puede observar como los primeros valores obtenidos tienen un mayor error; esto podría mejorarse con un post procesamiento de los datos o con un

detector de fase para que la medición empiece cuando ambas señales se encuentren en fase.

Un índice que nos habla de la calidad de las mediciones es la diferencia entre mediciones es el delta mínimo y máximo de las mediciones para el color RGB (255,255,255) se muestra en la tabla 4, donde también se puede observar que valor máximo de las mediciones tomadas con el contador de pulsos se vio afectado por las primeras mediciones capturadas, también en la tabla 3. En la tabla 2 también se observa el error relativo del contador de pulsos, el menor error se encontró en la medición del filtro 2 y el peor en la medición del filtro 4.

En la medición del color RGB (0,0,255), los diferenciales de frecuencia son mínimos para el contador Agilent y el máximo error se encontró en el filtro 2 con un 11.35%, como se muestra en la tabla 6 y en las diferencias máximas el contador experimental no tuvo saltos de frecuencia tan grandes como el contador Agilent donde el máximo fue de 9.650 Hz como se ve en la tabla 7.

Tabla 5
Resultados de mediciones RGB (0,0,255) con contador Agilent 53131a.

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	76.2991968	280.5432766	799.970181	1151.654956
Frecuencia máxima	76.8802801	281.1772251	809.952071	1162.977079
Δ Min	8E-07	4E-06	0.004213	0.004213
Δ Max	0.5756184	0.5902129	9.650533	9.650533
Promedio	76.77741047	280.9613917	800.5831042	1153.281738

Tabla 6
Resultados en medición RGB (0,0,255) en circuito Contador de pulsos Experimental y error relativo.

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	77.77777778	80	666.6666667	1000
Frecuencia máxima	78.94736842	453.5353535	800	1111.111111
Δ Min	0.03730856	0.098917221	0.24037411	0.110430964
Δ Max	0.515995872	4.797350624	83.33333333	111.1111111
Promedio	78.04692865	316.9507414	780.7677176	1107.895624
Error relativo	1.63%	11.35%	2.54%	4.10%

Tabla 7
Comparación de cambios en frecuencia en medición RGB (0,0,255) de ambos dispositivos.

	Contador de pulsos	Agilent 53131a
Δ Min	0.03730856	8E-07
Δ Max	0.24037411	9.650533

En la tabla 9 se encontró que el valor mínimo en la medición del filtro 3 el cambio de frecuencia mínimo fue 0 esto debido a que se obtuvieron valores consecutivos repetidos, en la medición del filtro 4 se encuentra un error relativo de 0.50%.

Tabla 8
Resultados de mediciones RGB (0,255,0) con contador Agilent 53131a.

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	245.96274	550.328344	276.31758	1087.7176
Frecuencia máxima	246.15	551.540238	278.71349	1109.6111
Δ Min	6.5E-06	3.9E-05	0.0380955	0.033121
Δ Max	0.953624	0.953624	0.9709375	6.660197
Promedio	246.07661	551.1279169	277.52903	1097.62

Tabla 9
Resultados en medición RGB (0,255,0) en circuito Contador de pulsos Experimental y error relativo.

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	230.76923	500	282.6087	1000
Frecuencia máxima	241.93548	555.5555556	333.33333	1106.383
Δ Min	0.2873563	0.086866581	0	0.1057389
Δ Max	4.5248869	16.04278075	14.285714	100
Promedio	241.10072	542.6587423	283.49592	1103.1861
Error relativo	2.06%	1.56%	2.10%	0.50%

Tabla 10
Comparación de cambios en frecuencia en medición RGB (255,0,0) de ambos dispositivos.

	Contador de pulsos	Agilent 53131a
Δ Min	0	6E-06
Δ Max	100	6.660197

Los resultados de las mediciones para el color RGB (255,0,0) se encuentran en la tabla 11 y 12, las diferencias máximas y mínimas se encuentran en la tabla 13.

Tabla 11
Resultados de mediciones RGB (255,0,0) con contador Agilent 53131a.

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	448.675527	128.28978	184.7291	719.62574
Frecuencia máxima	449.988563	128.53286	185.83964	721.03604
Δ Min	8E-05	0.001115	0.0014866	0.023343
Δ Max	1.019961	0.1605084	0.7403913	1.108745
Promedio	449.476011	128.39722	185.1562	720.50346

Tabla 12
Resultados en medición RGB (255,0,0) en circuito Contador de pulsos Experimental y error.

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	400	125	181.81818	666.66667
Frecuencia máxima	439.0243902	126.76056	184.21053	1000
Δ Min	0.085291803	0.0531632	0.0131167	0.1435671
Δ Max	28.57142857	1.7605634	2.3923445	333.33333
Promedio	437.8424666	126.14439	182.96849	714.95459
Error relativo	2.66%	1.79%	1.20%	0.78%

Tabla 13
Comparación de cambios en frecuencia en medición RGB (0,0,255) de ambos dispositivos.

	Contador de pulsos	Agilent 53131a
Δ Min	0.013116732	8E-05
Δ Max	333.3333333	1.108745

Se encontró que el mínimo error relativo de las mediciones realizadas con el contador de pulsos experimental fue del 0.5% (tabla 9, filtro 4) y el máximo de 54.35% (tabla 15 filtro 4), el porcentaje de error promedio se encuentra en 5.41% en este proceso de medición, aunque la mayoría se encontró entre el 1% y 2%.

En la tabla 14 se pueden observar los valores de frecuencia obtenidos para el color RGB (0,0,0), el color negro, se pueden observar que los valores de frecuencia tienden a ser mínimos comparados con mediciones anteriores.

El cambio mínimo de frecuencia o diferencial para el contador de pulsos experimental fue de cero Hz debido a que se repitieron valores en la medición correspondiente y el máximo fue de 1333.33 Hz esto debido a algunas mediciones iniciales que eran distantes del valor de frecuencia de referencia.

Tabla 14
Resultados de mediciones (0,0,0) con contador Agilent 53131a.

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	50.44715542	66.0913224	106.8296	202.6231
Frecuencia máxima	54.9226806	67.9145847	109.9621	223.62625
Δ Min	6.72E-05	2.978E-05	6E-06	0.1256539
Δ Max	2.81234108	1.041795	2.9870355	4.4971377
Promedio	54.47993128	67.00765898	109.65131	213.7834

Tabla 15
Resultados en medición RGB (0,0,0) en circuito Contador de pulsos Experimental y error relativo.

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Frecuencia mínima	53.95683453	65.2173913	96.774194	54.054054
Frecuencia máxima	54.05405405	101.6949153	157.89474	580.61224
Δ Min	0.00165518	0.032847195	0.0243024	0.0041312
Δ Max	0.097219522	67.84660767	61.120543	580.61224
Promedio	54.01994663	73.07031585	105.97656	468.34714
Error relativo	0.85%	8.30%	3.47%	54.35%

7. CONCLUSIONES

Las mediciones obtenidas nos permitieron saber qué frecuencias se obtienen con el sensor TCS3200 con los colores empleados y se logró utilizar el método de coincidencia de pulsos para la medición de estas frecuencias; este demostró tener un resultado aceptable para aplicaciones que no requieren una exactitud menor al 5.44% en el rango de frecuencias en el que se trabajó, se observó que con el aumento de la frecuencia los datos eran muy distantes entre sí como se puede observar en el anexo 3 en el filtro 4, el cual es la frecuencia más alta registrada y se encuentra alrededor de 2.5kHz, en las tablas mostradas en los resultados se puede observar como el valor máximo de frecuencia en los filtros se encuentra en tendencia al color medido comprobando así la funcionalidad de este sensor.

Para que se pudieran obtener buenas mediciones fue necesario diseñar un modelo 3D impreso para el sensor TCS3200 ya que es muy susceptible a los cambios de distancia, con este se dejó el sensor a una distancia fija de la pantalla RGB, igual es recomendable realizar un proceso de calibración donde se ajuste esta distancia y no permitir que entre luz del exterior al sistema más que la que proporciona el sensor con los led que tiene integrados; para obtener mayor precisión, los datos de frecuencia pueden ser procesados para obtener el color de la muestra, como se muestra en el artículo [46]

El método de coincidencia de pulsos demostró ser un buen método prometedor de medición con el que se pueden obtener mejores resultados procesando los datos como en la investigación [41] donde se utiliza la geometría de los datos para obtener un resultado más preciso en menor tiempo, con la metodología presentada en esta investigación se pueden obtener un promedio de 5.41% de error relativo tomando como estándar las mediciones del contador de frecuencia Agilentent 53531a, también

se observa que la estabilidad de las frecuencias obtenidas tienen cierta variación que deben ser contempladas cuando se mida una muestra con el sensor TCS3200 que sigue limitando las aplicaciones que requieran demasiada exactitud en la medición de color.

El método de coincidencia de pulsos utilizado no tuvo un posterior procesamiento de los datos obtenidos por el contador, en artículos [41,42,43,47,48] se han utilizado métodos de procesamiento de datos con los cuales se obtiene mayor precisión y se busca en trabajos futuros lograr implementar el método adecuado para procesar estas coincidencias.

Como se observó en el artículo [31] las señales de los sensores pueden ser multiplexadas lo cual permite que el sensor TCS3200 sea utilizado en aplicaciones donde se requiera utilizar múltiples sensores también en largas distancias como múltiples líneas de producción y poder monitorear los sensores conjuntamente.

7.1. Trabajos futuros

Se encontraron ciertas limitantes al utilizar el método de coincidencias con el circuito actual, los anchos de pulsos debieron ser calculados para obtener coincidencias al medir ciertas frecuencias, esto debido al ancho de los pulsos, también la duración de medición fue de un segundo lo cual limita la cantidad de muestras que se pueden obtener de una medición. Se busca en investigaciones posteriores poder mejorar estos aspectos para lograr un mejor aprovechamiento del método de coincidencia de pulsos, así como poder obtener resultados en tiempo real los cuales pueden ser fácilmente registrados para poder realizar mediciones automáticas y obtener un análisis más rápido de resultados.

ANEXOS

Anexo 1. Código para prototipo de prueba.

```

// include TFT and SPI libraries
#include <TFT.h>
#include <SPI.h>

// Definición de pines para el ectáng
//-----PANTALLA-----
#define cs 10
#define dc 9
#define rst 8
//-----SENSOR TCS3200-----
#define S0 4
#define S1 5
#define S2 6
#define S3 7
int Filter; //Selección de filtro
int Buttom = 3;
int L; //Tamaño de cuadrado
int i = 0;
// create an instance of the library
TFT TFTscreen = TFT(cs, dc, rst); //set TFT screen

void setup() {
  pinMode(S0, OUTPUT);
  pinMode(S1, OUTPUT);
  pinMode(S2, OUTPUT);
  pinMode(S3, OUTPUT);
  pinMode(Buttom, INPUT); //Buttom
  pinMode(13, OUTPUT);

  // Escala escala de sensor TCS3200 al 20%
  digitalWrite(S0, HIGH);
  digitalWrite(S1, LOW);

  //Inicializando ectángu del la pantalla TFT
  TFTscreen.begin();
  Serial.begin(9600);
  // clear the screen with a black background
  //----- ( B G R )-----
  TFTscreen.background(255, 0, 0);
}

void loop() {
  Buttom = digitalRead(3);

```

```
Filter = 4; //Selección de filtros
if (Button == HIGH) { //Cambio de filtro con botón
  Filter++;
  if (Filter == 5) {
    Filter = 1;
    delay(500);
  }
}

switch (Filter) { //FILTROS
  case 1:
    // Configurando a fotodiodos del tipo rojo
    digitalWrite(S2, LOW);
    digitalWrite(S3, LOW);
    break;
  case 2:
    // Configurando a fotodiodos del tipo verde
    digitalWrite(S2, HIGH);
    digitalWrite(S3, HIGH);
    break;
  case 3:
    // Configurando a fotodiodos del tipo verde
    digitalWrite(S2, LOW);
    digitalWrite(S3, HIGH);
    break;
  case 4:
    // Configurando a fotodiodos sin filtro
    digitalWrite(S2, HIGH);
    digitalWrite(S3, LOW);
    break;
}

Serial.println("Filter="); //Filtro seleccionado
Serial.println(Filter);

//delay(100);
}
```

Anexo 2. Resultado de mediciones capturadas con el contador de frecuencia comercial Agilent 53131

RGB (0,0,0)				
Filtro	1	2	3	4
1	53.5087759	66.9848773	109.7633378	206.6587889
2	53.7388448	66.0913224	109.7822728	205.6930147
3	54.055777	67.1331174	109.7827494	203.1220281
4	54.0557098	67.0104211	109.8209601	202.6230545
5	53.0149599	67.1177901	109.8209661	206.171522
6	52.34677915	67.3387352	109.901188	206.3580421
7	50.44715542	67.1537287	109.7738178	206.69712
8	53.2594965	67.0618739	109.8510967	207.6179348
9	53.4565028	66.86036	109.8265899	208.206211
10	54.5057843	66.8132505	109.8394465	206.8553726
11	54.7740656	66.7882028	106.8616966	207.4242422
12	54.75171	66.857741	106.8295607	205.2779224
13	54.7877397	66.95467205	109.8165962	207.1441138
14	54.8749364	66.9467205	109.8055638	208.3551821
15	54.8710996	66.9964799	109.8080948	207.5424948
16	54.8150721	66.9764799	109.7814324	206.0821698
17	54.856915	67.0971929	109.7550747	207.4927615
18	54.9091061	67.0158543	109.7573671	206.8417845
19	54.8459278	66.9220138	109.7606599	208.3457333
20	54.8466883	66.9706475	109.7577176	206.8714026
21	54.9226806	67.0390149	109.782883	207.1204718
22	54.8985579	66.86376111	109.9621024	209.3339842
23	54.8972344	66.8409128	109.7747999	211.3154651
24	54.9163726	66.84094258	109.7425843	212.0613971
25	54.8513443	66.7923393	109.759623	213.0837371
26	54.8149417	66.8632482	109.7348186	212.6156235
27	54.8591568	66.8819378	109.7517557	215.7363723
28	54.8613926	66.8738754	109.7328252	217.0962085
29	54.800467	66.7670358	109.7411695	213.0161008
30	54.805213	66.8527103	109.7524845	217.5132385
31	54.8751416	67.1242366	109.8075484	217.9270891
32	54.8065806	67.0727604	109.8124355	219.371413
33	54.7410401	67.0545314	109.8233298	220.0326948

34	54.8008256	67.1436819	109.8443473	220.8275321
35	54.7923605	67.1348887	109.8453966	221.1365914
36	54.7165793	66.9902737	109.8358708	221.9657529
37	54.6773611	67.172328	109.9075268	221.8054359
38	54.7711812	67.2298727	109.8467381	222.0043482
39	54.6780719	67.1419799	109.8467468	222.1906481
40	54.8370731	67.181608		222.4349589
41	54.7866852	67.2404519		222.1523094
42	54.7012644	67.0636703		222.2779633
43	54.687453	67.0414435		222.6055408
44	54.7463926	67.9145847		222.3035595
45	54.7213613	67.0500565		222.6279034
46	54.6650988	67.0160778		222.8718529
47	54.7057474	66.9939422		223.4755107
48	54.757358	67.0821695		223.626249
49	54.6986499	67.019473		223.4755107
50				

RGB (255,255,255)

Filtro	1	2	3	4
1	658.489896	824.5048	1057.318397	2450.440773
2	658.727454	824.531425	1057.192658	2498.889516
3	658.54099	824.223022	1057.589213	2429.006983
4	658.825104	824.482224	1057.482618	2381.795969
5	658.695487	824.305632	1057.782618	2409.812288
6	658.684014	824.342706	1057.995339	2404.805559
7	658.815269	824.352706	1057.641352	2412.909516
8	658.731179	824.22293	1057.813182	2431.490448
9	659.036558	824.135369	1057.860873	2453.708844
10	658.687431	824.265616	1057.777045	2460.093119
11	658.890653	823.968496	1058.14929	2490.220232
12	658.948812	824.131928	1056.372426	2505.020713
13	658.674073	823.852676	1056.166309	2508.40225
14	659.042494	823.906455	1057.945002	2505.601512
15	658.84883	824.095378	1058.109392	2503.835938
16	658.813283	823.78152	1057.886047	2501.647387
17	658.923499	829.803519	1057.890514	2499.550333
18	658.673428	823.883551	1058.888464	2501.999173
19	659.090251	823.760503	1058.088889	2501.133933
20	658.795599	823.488935	1057.889673	2502.653149
21	658.969184	823.78593	1058.842973	2503.554463
22	658.950611	823.591149	1058.242973	2502.337044
23	658.920361	823.734138	1057.738904	2499.954391
24	658.150898	823.578448	1058.054177	2498.00255
25	658.92328	823.402036	1057.736088	2503.956565
26	659.051804	823.66631	1057.978118	2504.448993
27	659.058932	823.398047	1058.058811	2495.065329
28	658.90341	823.787724	1057.916155	2498.581707
29	659.164588	822.421728	1058.910513	2496.618998
30	658.886223	823.420516	1057.82411	2499.465488
31	659.106115	823.569716	1058.003754	2503.148587
32	659.090106	823.765292	1057.790541	2503.959739
33	659.003328	823.878762	1057.921967	2501.956607
34	659.188637	823.383043	1057.736543	2502.006064
35	658.99895	823.750396	1058.158713	2503.345505
36	659.106632	823.396674	1057.715913	2502.167348
37	659.004133	823.594669	1057.978857	2499.32913

38	659.064116	829.594888	1057.764681	2490.536874
39	659.306916	823.397976	1057.959741	2485.61422
40	658.914113	823.233621	1058.030347	2465.477313
41	659.149508	823.609115	1057.780028	2466.952849
42	659.001311	823.042447	1058.100563	2496.708409
43	659.079311	823.224061	1057.865075	2498.568449
44	659.039884	823.260688	1057.970261	2494.128756
45	658.896932	822.898706	1057.723611	2491.478366
46	659.052829	823.380898	1057.865075	2483.365035
47	659.109838	823.034888	1057.764741	2479.272414
48			1057.554181	2463.371147
49			1057.794314	2463.031489
50				2455.933132

RGB (0,255,0)

Filtro	1	2	3	4
1	246.0555118	551.33271	277.3850111	1107.930941
2	246.0038663	551.417478	277.7294021	1106.753147
3	246.0764055	551.189075	277.06419	1107.826228
4	246.1358414	551.278746	277.3753436	1106.871303
5	246.0491203	551.278707	277.7079459	1106.095638
6	245.9627375	551.270707	277.2800471	1107.562007
7	246.0819134	551.000949	277.6232768	1107.219224
8	246.0819199	551.308313	277.8429795	1109.611101
9	246.1073353	550.784915	277.3130915	1104.766272
10	246.0420589	551.064455	276.7309756	1102.133102
11	246.0222011	550.917729	276.9085711	1101.51037
12	246.1219492	550.723812	277.0373956	1101.157552
13	246.0870093	551.144307	276.5861146	1101.287597
14	246.044316	550.954969	276.5431556	1102.311512
15	246.119516	550.771541	276.3175819	1104.319309
16	246.0382471	551.189304	276.8572871	1101.835691
17	246.0488129	551.083084	277.4000471	1102.195166
18	246.1261521	551.274406	277.8898811	1098.665243
19	246.0983558	551.228869	277.7940811	1098.880418
20	246.0635616	551.014324	277.685476	1101.216431
21	246.0566338	551.398188	277.8297068	1097.796603
22	246.1500008	551.061449	277.7576784	1097.358912
23	246.1060864	551.276868	277.8772971	1099.090224
24	246.0336477	551.281968	278.0904711	1098.489755
25	246.083048	550.328344	278.7134932	1098.099521
26	246.1227961	551.261599	277.7425557	1096.886313
27	246.0148046	551.326669	277.9589341	1096.223114
28	246.0351758	551.316226	277.9970296	1093.682548
29	246.1297684	551.540238	277.7970296	1096.173142
30	246.0822326	551.207331	277.2471517	1096.777123
31	246.0729999	551.333452	277.1020314	1096.875743
32	246.0741575	551.309723	277.3189648	1094.749395
33	246.146992	551.186679	277.0141926	1094.798824
34	246.0744252	551.436133	277.0858089	1093.486522
35	246.075144	551.125803	277.2899644	1092.266811
36	246.1140635	551.249374	277.092054	1092.105683

37	246.1246166	551.202241	276.7267932	1089.386125
38	246.0342402	551.017436	277.4056347	1089.353004
39	246.074418	551.210147	277.4733869	1088.948812
40	246.1363181	551.055428	277.335535	1091.289543
41	246.0639693	550.913582	277.9121239	1091.504771
42	245.9779432	551.271842	278.1680024	1090.885022
43	246.0836914	550.837001	277.5776978	1096.614384
44	246.137029	551.039617	277.6719339	1089.954187
45		551.003233	278.0214659	1091.131826
46		550.874384	278.2044304	1090.461448
47		551.131188	278.3173267	1090.302427
48		550.876856	278.595399	1089.391
49		550.96653	278.5265811	1087.717615
50			277.8838053	1089.052695

RGB (0,0,255)

Filtro	1	2	3	4
1	76.8246503	280.8862094	800.02375	1152.84624
2	76.7511078	280.999463	800.19888	1152.900661
3	76.7392992	281.01865	800.28381	1152.782445
4	76.816077	280.9767702	800.086397	1151.654956
5	76.762329	281.0261973	800.299961	1153.011061
6	76.7057848	281.0560862	799.970181	1153.336111
7	76.705784	280.9762437	800.219206	1153.459733
8	76.7057848	280.9874217	800.214993	1153.116651
9	76.7937155	281.0622286	800.039778	1153.076153
10	76.8250124	281.0381053	800.451384	1152.56191
11	76.7285597	281.0076066	800.067391	1153.609839
12	76.72585597	281.0265934	800.23889	1152.939383
13	76.7578054	281.0704608	800.152795	1153.58483
14	76.8265454	280.9593918	800.080127	1153.417001
15	76.756707	280.9926191	800.341464	1162.977079
16	76.762038	281.0713143	800.201208	1153.417001
17	76.762028	281.045875	800.496498	1152.742154
18	76.8802801	280.9317416	800.280857	1152.538788
19	76.825547	281.0647797	800.517689	1153.674066
20	76.7759229	281.1334895	800.549583	1152.437229
21	76.8742704	280.5432766	800.297503	1153.158408
22	76.8748152	280.5442252	800.649552	1153.028224
23	76.2991968	280.5442298	809.952071	1152.994924
24	76.8546157	280.8086234	800.301538	1153.126667
25	76.8793499	280.9646981	800.326371	1152.596299
26	76.8089047	280.9509924	800.28559	1153.814436
27	76.7915054	281.0028262	800.637077	1152.906113
28	76.786216	281.0074988	800.188302	1153.478468
29	76.8319456	280.8810169	800.441983	1152.913161
30	76.77771	280.959253	800.404559	1153.163996
31	76.8027348	280.9964765	800.442184	1153.377042
32	76.8437082	280.8706253	800.595342	1152.949732
33	76.807807	280.9055149	800.365518	1153.679704
34	76.7479287	280.9055189	800.706522	1152.582184
35	76.7796656	281.0097187	800.350569	1153.507577

36	76.7700247	280.9799063	800.514286	1153.507579
37	76.7528184	280.896961	800.505233	1152.771229
38	76.7438711	280.9762604	800.31537	1153.098166
39	76.7976455	281.0298135	800.825501	1153.227357
40	76.7976969	280.9353718	800.443597	1152.928296
41	76.8200567	280.9408846	800.596019	1153.409174
42	76.7779182	281.065812	800.500431	1152.715681
43		281.0378331	800.446261	1153.119484
44		280.7509861	800.693689	1152.966901
45		281.1247693	800.452299	1153.361351
46		281.1772251	800.802385	1153.173366
47		281.0438447	800.518278	1153.505148
48			800.627623	1152.379448
49			800.671609	
50			800.578487	

RGB (255,0,0)

Filtro	1	2	3	4
1	449.283527	128.304095	185.279702	720.377427
2	449.511988	128.360796	185.2756682	720.780833
3	449.542645	128.4366527	185.1650961	720.24411
4	449.453859	128.4318712	184.9444875	720.516499
5	449.702307	128.4571732	184.7291044	719.986659
6	449.468898	128.5328574	184.928096	720.705503
7	449.488544	128.5113385	184.8871182	720.536499
8	449.400544	128.4885667	184.8242285	720.265604
9	449.695488	128.3875498	184.8640149	720.720649
10	448.675527	128.425017	185.0402862	719.859164
11	449.190213	128.4211411	185.1172655	720.589106
12	449.199497	128.4524978	185.1403838	720.565763
13	449.101189	128.4577844	185.1181039	720.164616
14	449.738737	128.5243859	185.0605382	720.728722
15	449.387395	128.4970531	185.2841762	720.39187
16	449.37027	128.456195	185.3872589	720.483347
17	449.645866	128.3502899	185.2746836	720.454637
18	449.396313	128.3339711	185.1505474	720.484127
19	449.988563	128.3019796	185.1172301	720.654488
20	449.591403	128.3848352	185.1988143	720.858185
21	449.591483	128.3859502	185.2989226	720.712191
22	449.283983	128.3978664	185.1284039	720.259203
23	449.587298	128.4455589	185.0183458	720.440675
24	449.353128	128.4692571	184.9591372	720.741844
25	449.385005	128.3753045	185.2024521	720.387403
26	449.72629	128.3010191	185.24154	720.869791
27	449.310512	128.3255244	185.152534	720.424784
28	449.547311	128.2897766	185.0632617	719.625744
29	449.571588	128.3065026	185.0647483	720.734489
30	449.313808	128.2960371	185.2091365	720.369619
31	449.583048	128.365084	185.3354632	721.036042
32	449.589088	128.4397407	185.1530735	720.373203
33	449.474704	128.4451722	185.0746817	720.696819
34	449.403711	128.3958859	184.945798	720.595245
35	449.703752	128.361311	185.3122371	719.964011

36	449.388819	128.3248616	185.2811387	720.731488
37	449.371521	128.3573758	185.1565779	720.41216
38	449.700251	128.3340073	185.0992469	720.737148
39	449.394727	128.3803741	185.8396382	720.638098
40	449.566931	128.3558244	185.4648972	720.504763
41	449.608672	128.4876765	185.3942775	720.695484
42	449.125697	128.3271681	185.320938	720.167876
43	449.574421		185.2132703	720.813416
44	449.399831			720.587017
45	449.522064			720.541676
46	449.732522			720.617127
47	449.4719			720.406166
48	449.545058			720.628193
49	449.664644			720.589936
50	449.39919			

Anexo. 3 concentrado de mediciones con contador de pulsos

RGB (255,255,255)	to = 1ms	Filtro 1	Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	tx
2	0	2	0	
3	6	1	6	2000
2	12	-1	6	666.6666667
3	18	1	6	666.6666667
6	37	3	19	648.6486486
7	43	1	6	651.1627907
10	49	3	6	816.3265306
11	68	1	19	647.0588235
14	74	3	6	756.7567568
15	80	1	6	750
14	86	-1	6	651.1627907
17	105	3	19	647.6190476
18	111	1	6	648.6486486
19	117	1	6	649.5726496
22	136	3	19	647.0588235
23	142	1	6	647.8873239
24	148	1	6	648.6486486
27	167	3	19	646.7065868
28	173	1	6	647.3988439
29	179	1	6	648.0446927
30	185	1	6	648.6486486
32	198	2	13	646.4646465
33	204	1	6	647.0588235
34	210	1	6	647.6190476
35	216	1	6	648.1481481
38	235	3	19	646.8085106
39	241	1	6	647.3029046
40	247	1	6	647.7732794
43	266	3	19	646.6165414
44	272	1	6	647.0588235
45	278	1	6	647.4820144
46	284	1	6	647.8873239
49	303	3	19	646.8646865
50	309	1	6	647.2491909

RGB (255,255,255)	to = 1ms		Filtro 2	Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0		
1	5	1	5	800	0.00125
2	10	1	5	800	0.00125
3	15	1	5	800	0.00125
6	29	3	14	827.5862069	0.001208333
7	34	1	5	823.5294118	0.001214286
8	39	1	5	820.5128205	0.00121875
9	44	1	5	818.1818182	0.001222222
12	58	3	14	827.5862069	0.001208333
13	63	1	5	825.3968254	0.001211538
14	68	1	5	823.5294118	0.001214286
15	73	1	5	821.9178082	0.001216667
18	87	3	14	827.5862069	0.001208333
19	92	1	5	826.0869565	0.001210526
20	97	1	5	824.742268	0.0012125
21	102	1	5	823.5294118	0.001214286
24	116	3	14	827.5862069	0.001208333
25	121	1	5	826.446281	0.00121
26	126	1	5	825.3968254	0.001211538
27	131	1	5	824.4274809	0.001212963
29	140	2	9	828.5714286	0.001206897
30	145	1	5	827.5862069	0.001208333
31	150	1	5	826.6666667	0.001209677
32	155	1	5	825.8064516	0.001210938
35	169	3	14	828.4023669	0.001207143
36	174	1	5	827.5862069	0.001208333
37	179	1	5	826.8156425	0.001209459
38	184	1	5	826.0869565	0.001210526
41	198	3	14	828.2828283	0.001207317
42	203	1	5	827.5862069	0.001208333
43	208	1	5	826.9230769	0.001209302
44	213	1	5	826.2910798	0.001210227
47	227	3	14	828.1938326	0.001207447
48	232	1	5	827.5862069	0.001208333
49	237	1	5	827.0042194	0.001209184
50	242	1	5	826.446281	0.00121

RGB (255,255,255) $t_0 = 1\text{ms}$		Filtro 3		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
1109	5550	1109	5550		
1	5	1	5	200	0.005
2	10	1	5	200	0.005
3	15	1	5	200	0.005
4	20	1	5	200	0.005
5	25	1	5	200	0.005
6	30	1	5	200	0.005
7	35	1	5	200	0.005
8	40	1	5	200	0.005
9	45	1	5	200	0.005
10	50	1	5	200	0.005
11	55	1	5	200	0.005
12	60	1	5	200	0.005
13	65	1	5	200	0.005
14	70	1	5	200	0.005
15	75	1	5	200	0.005
16	80	1	5	200	0.005
17	85	1	5	200	0.005
18	90	1	5	200	0.005
19	95	1	5	200	0.005
20	100	1	5	200	0.005
21	105	1	5	200	0.005
22	110	1	5	200	0.005
23	115	1	5	200	0.005
24	120	1	5	200	0.005
25	125	1	5	200	0.005
26	130	1	5	200	0.005
27	135	1	5	200	0.005
28	140	1	5	200	0.005
29	145	1	5	200	0.005
30	150	1	5	200	0.005
31	155	1	5	200	0.005
32	160	1	5	200	0.005
33	165	1	5	200	0.005
34	170	1	5	200	0.005

RGB (255,255,255)	to = 1ms	Filtro 4		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0		
1	4	1	4	1000	0.001
2	8	1	4	1000	0.001
3	12	1	4	1000	0.001
4	16	1	4	1000	0.001
5	20	1	4	1000	0.001
6	24	1	4	1000	0.001
10	39	4	15	1025.641026	0.000975
11	43	1	4	1023.255814	0.000977273
12	47	1	4	1021.276596	0.000979167
13	51	1	4	1019.607843	0.000980769
14	55	1	4	1018.181818	0.000982143
15	59	1	4	1016.949153	0.000983333
16	63	1	4	1015.873016	0.000984375
20	78	4	15	1025.641026	0.000975
21	82	1	4	1024.390244	0.00097619
22	86	1	4	1023.255814	0.000977273
23	90	1	4	1022.222222	0.000978261
24	94	1	4	1021.276596	0.000979167
25	98	1	4	1020.408163	0.00098
26	102	1	4	1019.607843	0.000980769
30	117	4	15	1025.641026	0.000975
31	121	1	4	1024.793388	0.000975806
32	125	1	4	1024	0.000976563
33	129	1	4	1023.255814	0.000977273
34	133	1	4	1022.556391	0.000977941
35	137	1	4	1021.89781	0.000978571
36	141	1	4	1021.276596	0.000979167
41	160	5	19	1025	0.00097561
42	164	1	4	1024.390244	0.00097619
43	168	1	4	1023.809524	0.000976744
44	172	1	4	1023.255814	0.000977273
45	176	1	4	1022.727273	0.000977778
46	180	1	4	1022.222222	0.000978261
51	199	5	19	1025.125628	0.00097549

RGB (0,0,255) to = 1ms		Filtro 1		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δn_x	Δn_o	fx	tx
3	38	3	38	78.94736842	0.012667
3	38	3	38	78.94736842	0.012667
4	51	1	13	78.43137255	0.01275
5	64	1	13	78.125	0.0128
6	77	1	13	77.92207792	0.012833
10	128	4	51	78.125	0.0128
10	128	10	128	78.125	0.0128
11	141	1	13	78.0141844	0.012818
12	154	1	13	77.92207792	0.012833
13	167	1	13	77.84431138	0.012846
14	180	1	13	77.77777778	0.012857
18	231	4	51	77.92207792	0.012833
18	231	18	231	77.92207792	0.012833
19	244	1	13	77.86885246	0.012842
20	257	1	13	77.82101167	0.01285
21	270	1	13	77.77777778	0.012857
24	308	3	38	77.92207792	0.012833
24	308	0	0	77.92207792	0.012833
25	321	1	13	77.88161994	0.01284
26	334	1	13	77.84431138	0.012846
30	385	4	51	77.92207792	0.012833

RGB (0,0,255)	to = 1ms		Filtro 2	Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δn_x	Δno	fx	tx
2	25	2	25	80	0.0125
4	50	2	25	80	0.0125
6	75	2	25	80	0.0125
8	100	2	25	80	0.0125
10	125	2	25	80	0.0125
12	150	2	25	80	0.0125
14	175	2	25	80	0.0125
16	200	2	25	80	0.0125
18	225	2	25	80	0.0125
20	250	2	25	80	0.0125
22	275	2	25	80	0.0125
24	300	2	25	80	0.0125
26	325	2	25	80	0.0125
29	352	3	27	82.38636364	0.012137931
29	352	29	352	82.38636364	0.012137931
30	354	1	2	84.74576271	0.0118
31	356	1	2	87.07865169	0.011483871
32	358	1	2	89.38547486	0.0111875
34	361	2	3	94.18282548	0.010617647
35	363	1	2	96.41873278	0.010371429
37	366	2	3	101.0928962	0.009891892
39	369	2	3	105.6910569	0.009461538
40	371	1	2	107.8167116	0.009275
41	372	1	1	110.2150538	0.009073171
42	374	1	2	112.2994652	0.008904762
43	375	1	1	114.6666667	0.00872093
44	377	1	2	116.7108753	0.008568182
45	378	1	1	119.047619	0.0084
46	380	1	2	121.0526316	0.00826087
48	383	2	3	125.3263708	0.007979167
50	386	2	3	129.5336788	0.00772
52	389	2	3	133.6760925	0.007480769
54	392	2	3	137.755102	0.007259259
56	395	2	3	141.7721519	0.007053571
58	398	2	3	145.7286432	0.006862069

RGB (0,0,255)	to = 1ms	Filtro 3		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0	0	0
2	3	2	3	666.6666667	0.0015
3	4	1	1	750	0.001333333
4	5	1	1	800	0.00125
6	8	2	3	750	0.001333333
7	9	1	1	777.7777778	0.001285714
8	10	1	1	800	0.00125
10	13	2	3	769.2307692	0.0013
11	14	1	1	785.7142857	0.001272727
13	17	2	3	764.7058824	0.001307692
14	18	1	1	777.7777778	0.001285714
15	19	1	1	789.4736842	0.001266667
17	22	2	3	772.7272727	0.001294118
18	23	1	1	782.6086957	0.001277778
20	26	2	3	769.2307692	0.0013
21	27	1	1	777.7777778	0.001285714
22	28	1	1	785.7142857	0.001272727
24	31	2	3	774.1935484	0.001291667
25	32	1	1	781.25	0.00128
27	35	2	3	771.4285714	0.001296296
28	36	1	1	777.7777778	0.001285714
29	37	1	1	783.7837838	0.001275862
31	40	2	3	775	0.001290323
32	41	1	1	780.4878049	0.00128125
33	42	1	1	785.7142857	0.001272727
35	45	2	3	777.7777778	0.001285714
36	46	1	1	782.6086957	0.001277778
38	49	2	3	775.5102041	0.001289474
39	50	1	1	780	0.001282051
40	51	1	1	784.3137255	0.001275
42	54	2	3	777.7777778	0.001285714
43	55	1	1	781.8181818	0.00127907
45	58	2	3	775.862069	0.001288889
46	59	1	1	779.6610169	0.001282609
47	60	1	1	783.3333333	0.001276596

RGB (0,0,255) to = 1ms		Filtro 4		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0	0	
1	1	1	1	1000	0.001
2	2	1	1	1000	0.001
3	3	1	1	1000	0.001
4	4	1	1	1000	0.001
5	5	1	1	1000	0.001
6	6	1	1	1000	0.001
10	9	4	3	1111.111111	0.0009
11	10	1	1	1100	0.000909091
12	11	1	1	1090.909091	0.000916667
13	12	1	1	1083.333333	0.000923077
14	13	1	1	1076.923077	0.000928571
15	14	1	1	1071.428571	0.000933333
16	15	1	1	1066.666667	0.0009375
20	18	4	3	1111.111111	0.0009
21	19	1	1	1105.263158	0.000904762
22	20	1	1	1100	0.000909091
23	21	1	1	1095.238095	0.000913043
24	22	1	1	1090.909091	0.000916667
25	23	1	1	1086.956522	0.00092
26	24	1	1	1083.333333	0.000923077
27	25	1	1	1080	0.000925926
30	27	3	2	1111.111111	0.0009
31	28	1	1	1107.142857	0.000903226
32	29	1	1	1103.448276	0.00090625
33	30	1	1	1100	0.000909091
34	31	1	1	1096.774194	0.000911765
35	32	1	1	1093.75	0.000914286
36	33	1	1	1090.909091	0.000916667
37	34	1	1	1088.235294	0.000918919
40	36	3	2	1111.111111	0.0009
41	37	1	1	1108.108108	0.000902439
42	38	1	1	1105.263158	0.000904762
43	39	1	1	1102.564103	0.000906977
44	40	1	1	1100	0.000909091

RGB (0,255,0)	to = 1ms		Filtro 1	Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δn x	ΔnO	fx	tx
0	0	0	0		
3	13	3	13	230.7692308	0.004333333
4	17	1	4	235.2941176	0.00425
5	21	1	4	238.0952381	0.0042
6	25	1	4	240	0.004166667
7	29	1	4	241.3793103	0.004142857
11	46	4	17	239.1304348	0.004181818
12	50	1	4	240	0.004166667
13	54	1	4	240.7407407	0.004153846
14	58	1	4	241.3793103	0.004142857
15	62	1	4	241.9354839	0.004133333
18	75	3	13	240	0.004166667
19	79	1	4	240.5063291	0.004157895
20	83	1	4	240.9638554	0.00415
21	87	1	4	241.3793103	0.004142857
22	91	1	4	241.7582418	0.004136364
25	104	3	13	240.3846154	0.00416
26	108	1	4	240.7407407	0.004153846
27	112	1	4	241.0714286	0.004148148
28	116	1	4	241.3793103	0.004142857
29	120	1	4	241.6666667	0.004137931
32	133	3	13	240.6015038	0.00415625
33	137	1	4	240.8759124	0.004151515
34	141	1	4	241.1347518	0.004147059
35	145	1	4	241.3793103	0.004142857
36	149	1	4	241.6107383	0.004138889
39	162	3	13	240.7407407	0.004153846
40	166	1	4	240.9638554	0.00415
41	170	1	4	241.1764706	0.004146341
42	174	1	4	241.3793103	0.004142857
43	178	1	4	241.5730337	0.004139535
46	191	3	13	240.8376963	0.004152174
47	195	1	4	241.025641	0.004148936
48	199	1	4	241.2060302	0.004145833

RGB (0,255,0) to = 1ms		Filtro 2		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δn_x	Δn_o	fx	tx
0	0	0	0		
1	2	1	2	500	0.002
2	4	1	2	500	0.002
3	6	1	2	500	0.002
5	9	2	3	555.5555556	0.0018
6	11	1	2	545.4545455	0.001833333
7	13	1	2	538.4615385	0.001857143
8	15	1	2	533.3333333	0.001875
9	17	1	2	529.4117647	0.001888889
12	22	3	5	545.4545455	0.001833333
13	24	1	2	541.6666667	0.001846154
14	26	1	2	538.4615385	0.001857143
15	28	1	2	535.7142857	0.001866667
18	33	3	5	545.4545455	0.001833333
19	35	1	2	542.8571429	0.001842105
20	37	1	2	540.5405405	0.00185
21	39	1	2	538.4615385	0.001857143
22	41	1	2	536.5853659	0.001863636
24	44	2	3	545.4545455	0.001833333
25	46	1	2	543.4782609	0.00184
26	48	1	2	541.6666667	0.001846154
27	50	1	2	540	0.001851852
28	52	1	2	538.4615385	0.001857143
31	57	3	5	543.8596491	0.00183871
32	59	1	2	542.3728814	0.00184375
33	61	1	2	540.9836066	0.001848485
34	63	1	2	539.6825397	0.001852941
37	68	3	5	544.1176471	0.001837838
38	70	1	2	542.8571429	0.001842105
39	72	1	2	541.6666667	0.001846154
40	74	1	2	540.5405405	0.00185
43	79	3	5	544.3037975	0.001837209
44	81	1	2	543.2098765	0.001840909
45	83	1	2	542.1686747	0.001844444
46	85	1	2	541.1764706	0.001847826

RGB (0,255,0)		to = 1ms		Filtro 3	Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno		fx	tx
0	0	0	0			
1	3	1	3		333.3333333	0.003
2	7	1	4		285.7142857	0.0035
3	10	1	3		300	0.003333333
4	14	1	4		285.7142857	0.0035
6	21	2	7		285.7142857	0.0035
8	28	2	7		285.7142857	0.0035
10	35	2	7		285.7142857	0.0035
12	42	2	7		285.7142857	0.0035
13	46	1	4		282.6086957	0.003538462
14	49	1	3		285.7142857	0.0035
15	53	1	4		283.0188679	0.003533333
16	56	1	3		285.7142857	0.0035
17	60	1	4		283.3333333	0.003529412
18	63	1	3		285.7142857	0.0035
19	67	1	4		283.5820896	0.003526316
21	74	2	7		283.7837838	0.00352381
23	81	2	7		283.9506173	0.003521739
25	88	2	7		284.0909091	0.00352
27	95	2	7		284.2105263	0.003518519
28	99	1	4		282.8282828	0.003535714
29	102	1	3		284.3137255	0.003517241
30	106	1	4		283.0188679	0.003533333
31	109	1	3		284.4036697	0.003516129
32	113	1	4		283.1858407	0.00353125
33	116	1	3		284.4827586	0.003515152
34	120	1	4		283.3333333	0.003529412
36	127	2	7		283.4645669	0.003527778
38	134	2	7		283.5820896	0.003526316
40	141	2	7		283.6879433	0.003525
42	148	2	7		283.7837838	0.00352381
43	152	1	4		282.8947368	0.003534884
44	155	1	3		283.8709677	0.003522727
45	159	1	4		283.0188679	0.003533333
46	162	1	3		283.9506173	0.003521739

RGB (0,255,0)	to = 1ms		Filtro 3	Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0		
1	3	1	3	333.3333333	0.003
2	7	1	4	285.7142857	0.0035
3	10	1	3	300	0.003333333
4	14	1	4	285.7142857	0.0035
6	21	2	7	285.7142857	0.0035
8	28	2	7	285.7142857	0.0035
10	35	2	7	285.7142857	0.0035
12	42	2	7	285.7142857	0.0035
13	46	1	4	282.6086957	0.003538462
14	49	1	3	285.7142857	0.0035
15	53	1	4	283.0188679	0.003533333
16	56	1	3	285.7142857	0.0035
17	60	1	4	283.3333333	0.003529412
18	63	1	3	285.7142857	0.0035
19	67	1	4	283.5820896	0.003526316
21	74	2	7	283.7837838	0.00352381
23	81	2	7	283.9506173	0.003521739
25	88	2	7	284.0909091	0.00352
27	95	2	7	284.2105263	0.003518519
28	99	1	4	282.8282828	0.003535714
29	102	1	3	284.3137255	0.003517241
30	106	1	4	283.0188679	0.003533333
31	109	1	3	284.4036697	0.003516129
32	113	1	4	283.1858407	0.00353125
33	116	1	3	284.4827586	0.003515152
34	120	1	4	283.3333333	0.003529412
36	127	2	7	283.4645669	0.003527778
38	134	2	7	283.5820896	0.003526316
40	141	2	7	283.6879433	0.003525
42	148	2	7	283.7837838	0.00352381
43	152	1	4	282.8947368	0.003534884
44	155	1	3	283.8709677	0.003522727
45	159	1	4	283.0188679	0.003533333
46	162	1	3	283.9506173	0.003521739

RGB (255,0,0)	to = 1ms	Filtro 1		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0		
2	5	2	5	400	0.0025
3	7	1	2	428.5714286	0.002333333
5	12	2	5	416.6666667	0.0024
6	14	1	2	428.5714286	0.002333333
7	16	1	2	437.5	0.002285714
9	21	2	5	428.5714286	0.002333333
10	23	1	2	434.7826087	0.0023
12	28	2	5	428.5714286	0.002333333
13	30	1	2	433.3333333	0.002307692
14	32	1	2	437.5	0.002285714
16	37	2	5	432.4324324	0.0023125
17	39	1	2	435.8974359	0.002294118
18	41	1	2	439.0243902	0.002277778
20	46	2	5	434.7826087	0.0023
21	48	1	2	437.5	0.002285714
23	53	2	5	433.9622642	0.002304348
24	55	1	2	436.3636364	0.002291667
25	57	1	2	438.5964912	0.00228
27	62	2	5	435.483871	0.002296296
28	64	1	2	437.5	0.002285714
30	69	2	5	434.7826087	0.0023
31	71	1	2	436.6197183	0.002290323
32	73	1	2	438.3561644	0.00228125
34	78	2	5	435.8974359	0.002294118
35	80	1	2	437.5	0.002285714
37	85	2	5	435.2941176	0.002297297
38	87	1	2	436.7816092	0.002289474
39	89	1	2	438.2022472	0.002282051
41	94	2	5	436.1702128	0.002292683
42	96	1	2	437.5	0.002285714
45	103	3	7	436.8932039	0.002288889
46	105	1	2	438.0952381	0.002282609
48	110	2	5	436.3636364	0.002291667
49	112	1	2	437.5	0.002285714
50	114	1	2	438.5964912	0.00228

RGB (255,0,0) to = 1ms		Filtro 2		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0		
1	8	1	8	125	0.008
2	16	1	8	125	0.008
3	24	1	8	125	0.008
4	32	1	8	125	0.008
9	71	5	39	126.7605634	0.007888889
9	71	9	71	126.7605634	0.007888889
10	79	1	8	126.5822785	0.0079
11	87	1	8	126.4367816	0.007909091
12	95	1	8	126.3157895	0.007916667
13	103	1	8	126.2135922	0.007923077
14	111	1	8	126.1261261	0.007928571
15	119	1	8	126.0504202	0.007933333
20	158	5	39	126.5822785	0.0079
20	158	20	158	126.5822785	0.0079
21	166	1	8	126.5060241	0.007904762
22	174	1	8	126.4367816	0.007909091
23	182	1	8	126.3736264	0.007913043
24	190	1	8	126.3157895	0.007916667
25	198	1	8	126.2626263	0.00792
30	237	5	39	126.5822785	0.0079

RGB (255,0,0)	to = 1ms	Filtro 3		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0		
2	11	2	11	181.8181818	0.0055
4	22	2	11	181.8181818	0.0055
6	33	2	11	181.8181818	0.0055
7	38	1	5	184.2105263	0.005428571
8	44	1	6	181.8181818	0.0055
9	49	1	5	183.6734694	0.005444444
10	55	1	6	181.8181818	0.0055
11	60	1	5	183.3333333	0.005454545
13	71	2	11	183.0985915	0.005461538
15	82	2	11	182.9268293	0.005466667
17	93	2	11	182.7956989	0.005470588
19	104	2	11	182.6923077	0.005473684
20	109	1	5	183.4862385	0.00545
21	115	1	6	182.6086957	0.00547619
22	120	1	5	183.3333333	0.005454545
23	126	1	6	182.5396825	0.005478261
24	131	1	5	183.2061069	0.005458333
26	142	2	11	183.0985915	0.005461538
28	153	2	11	183.0065359	0.005464286
30	164	2	11	182.9268293	0.005466667
32	175	2	11	182.8571429	0.00546875
33	180	1	5	183.3333333	0.005454545
34	186	1	6	182.7956989	0.005470588
35	191	1	5	183.2460733	0.005457143
36	197	1	6	182.7411168	0.005472222
37	202	1	5	183.1683168	0.005459459
39	213	2	11	183.0985915	0.005461538
41	224	2	11	183.0357143	0.005463415
43	235	2	11	182.9787234	0.005465116
45	246	2	11	182.9268293	0.005466667
46	251	1	5	183.2669323	0.005456522
47	257	1	6	182.8793774	0.005468085
48	262	1	5	183.2061069	0.005458333
49	268	1	6	182.8358209	0.005469388
50	273	1	5	183.1501832	0.00546

RGB (255,0,0) to = 1ms		Filtro 4		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0		
1	1	1	1	1000	0.001
2	3	1	2	666.6666667	0.0015
3	4	1	1	750	0.001333333
5	7	2	3	714.2857143	0.0014
6	8	1	1	750	0.001333333
7	10	1	2	700	0.001428571
8	11	1	1	727.2727273	0.001375
10	14	2	3	714.2857143	0.0014
11	15	1	1	733.3333333	0.001363636
12	17	1	2	705.8823529	0.001416667
13	18	1	1	722.2222222	0.001384615
15	21	2	3	714.2857143	0.0014
16	22	1	1	727.2727273	0.001375
17	24	1	2	708.3333333	0.001411765
18	25	1	1	720	0.001388889
20	28	2	3	714.2857143	0.0014
21	29	1	1	724.137931	0.001380952
22	31	1	2	709.6774194	0.001409091
23	32	1	1	718.75	0.001391304
25	35	2	3	714.2857143	0.0014
26	36	1	1	722.2222222	0.001384615
27	38	1	2	710.5263158	0.001407407
28	39	1	1	717.9487179	0.001392857
30	42	2	3	714.2857143	0.0014
31	43	1	1	720.9302326	0.001387097
32	45	1	2	711.1111111	0.00140625
33	46	1	1	717.3913043	0.001393939
35	49	2	3	714.2857143	0.0014
37	52	2	3	711.5384615	0.001405405
38	53	1	1	716.9811321	0.001394737
40	56	2	3	714.2857143	0.0014
42	59	2	3	711.8644068	0.001404762
43	60	1	1	716.6666667	0.001395349
45	63	2	3	714.2857143	0.0014
47	66	2	3	712.1212121	0.001404255

RGB (0,0,0)		to = 1ms	Filtro 1		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx	
0	0	0	0	0	0	0
2	37	2	37	54.05405405	0.0185	
4	74	2	37	54.05405405	0.0185	
6	111	2	37	54.05405405	0.0185	
8	148	2	37	54.05405405	0.0185	
10	185	2	37	54.05405405	0.0185	
12	222	2	37	54.05405405	0.0185	
14	259	2	37	54.05405405	0.0185	
15	278	1	19	53.95683453	0.018533333	
16	296	1	18	54.05405405	0.0185	
17	315	1	19	53.96825397	0.018529412	
18	333	1	18	54.05405405	0.0185	
19	352	1	19	53.97727273	0.018526316	
20	370	1	18	54.05405405	0.0185	
21	389	1	19	53.98457584	0.01852381	
22	407	1	18	54.05405405	0.0185	
23	426	1	19	53.99061033	0.018521739	
24	444	1	18	54.05405405	0.0185	
25	463	1	19	53.99568035	0.01852	
26	481	1	18	54.05405405	0.0185	
27	500	1	19	54	0.018518519	
29	537	2	37	54.00372439	0.018517241	
31	574	2	37	54.00696864	0.018516129	
33	611	2	37	54.00981997	0.018515152	
35	648	2	37	54.01234568	0.018514286	
37	685	2	37	54.01459854	0.018513514	
39	722	2	37	54.0166205	0.018512821	
41	759	2	37	54.01844532	0.018512195	
43	796	2	37	54.0201005	0.018511628	
44	815	1	19	53.98773006	0.018522727	
45	833	1	18	54.02160864	0.018511111	
46	852	1	19	53.99061033	0.018521739	
47	870	1	18	54.02298851	0.018510638	
48	889	1	19	53.99325084	0.018520833	
49	907	1	18	54.02425579	0.018510204	

RGB (0,0,0)	to = 1ms	Filtro 2		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δn_x	Δno	fx	tx
2	2	2	2	1000	0.001
3	15	1	13	200	0.005
3	46	0	31	65.2173913	0.015333333
6	59	3	13	101.6949153	0.009833333
7	74	1	15	94.59459459	0.010571429
7	103	0	29	67.96116505	0.014714286
10	118	3	15	84.74576271	0.0118
11	135	1	17	81.48148148	0.012272727
11	162	0	27	67.90123457	0.014727273
14	179	3	17	78.2122905	0.012785714
15	192	1	13	78.125	0.0128
15	221	0	29	67.87330317	0.014733333
18	236	3	15	76.27118644	0.013111111
19	251	1	15	75.69721116	0.013210526
19	280	0	29	67.85714286	0.014736842
20	295	1	15	67.79661017	0.01475
23	339	3	44	67.84660767	0.01473913
23	339	23	339	67.84660767	0.01473913
24	354	1	15	67.79661017	0.01475
27	398	3	44	67.83919598	0.014740741
27	398	27	398	67.83919598	0.014740741
28	413	1	15	67.79661017	0.01475
31	457	3	44	67.83369803	0.014741935
31	457	31	457	67.83369803	0.014741935
32	472	1	15	67.79661017	0.01475
35	516	3	44	67.82945736	0.014742857

RGB (0,0,0)	to = 1ms		Filtro 3	Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
2	2	2	2	1000	0.001
2	19	0	17	105.2631579	0.0095
3	31	1	12	96.77419355	0.010333333
6	38	3	7	157.8947368	0.006333333
7	50	1	12	140	0.007142857
7	67	0	17	104.4776119	0.009571429
10	79	3	12	126.5822785	0.0079
10	98	0	19	102.0408163	0.0098
11	106	1	8	103.7735849	0.009636364
14	115	3	9	121.7391304	0.008214286
15	127	1	12	118.1102362	0.008466667
15	146	0	19	102.739726	0.009733333
18	154	3	8	116.8831169	0.008555556
18	175	0	21	102.8571429	0.009722222
19	183	1	8	103.8251366	0.009631579
20	194	1	11	103.0927835	0.0097
21	202	1	8	103.960396	0.009619048
23	223	2	21	103.1390135	0.009695652
24	231	1	8	103.8961039	0.009625
25	240	1	9	104.1666667	0.0096
26	250	1	10	104	0.009615385
28	269	2	19	104.0892193	0.009607143
29	279	1	10	103.9426523	0.00962069
30	288	1	9	104.1666667	0.0096
31	298	1	10	104.0268456	0.009612903
33	317	2	19	104.1009464	0.009606061
34	327	1	10	103.9755352	0.009617647
35	336	1	9	104.1666667	0.0096
36	346	1	10	104.0462428	0.009611111
38	365	2	19	104.109589	0.009605263
39	375	1	10	104	0.009615385
41	394	2	19	104.0609137	0.009609756
43	413	2	19	104.1162228	0.009604651
44	423	1	10	104.0189125	0.009613636
46	442	2	19	104.0723982	0.009608696
47	452	1	10	103.9823009	0.009617021

RGB (0,0,0) to = 1ms		Filtro 4		Frecuencia (Hz)	Periodo
nx	no	Δnx	Δno	fx	tx
0	0	0	0	0	0
1	18	1	18	55.55555556	0.018
2	37	1	19	54.05405405	0.0185
3	55	1	18	54.54545455	0.018333333
4	74	1	19	54.05405405	0.0185
5	92	1	18	54.34782609	0.0184
6	111	1	19	54.05405405	0.0185
7	125	1	14	56	0.017857143
11	134	4	9	82.08955224	0.012181818
12	136	1	2	88.23529412	0.011333333
13	138	1	2	94.20289855	0.010615385
14	139	1	1	100.7194245	0.009928571
15	141	1	2	106.3829787	0.0094
17	144	2	3	118.0555556	0.008470588
19	147	2	3	129.2517007	0.007736842
21	150	2	3	140	0.007142857
22	152	1	2	144.7368421	0.006909091
23	153	1	1	150.3267974	0.006652174
24	155	1	2	154.8387097	0.006458333
25	156	1	1	160.2564103	0.00624
26	158	1	2	164.556962	0.006076923
27	159	1	1	169.8113208	0.005888889
28	161	1	2	173.9130435	0.00575
29	162	1	1	179.0123457	0.005586207
30	164	1	2	182.9268293	0.005466667
31	165	1	1	187.8787879	0.005322581
32	167	1	2	191.6167665	0.00521875
34	170	2	3	200	0.005
36	173	2	3	208.0924855	0.004805556
38	176	2	3	215.9090909	0.004631579
40	179	2	3	223.4636872	0.004475
42	182	2	3	230.7692308	0.004333333
44	185	2	3	237.8378378	0.004204545
46	188	2	3	244.6808511	0.004086957
48	191	2	3	251.3089005	0.003979167

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Einstein, Albert. La evolución de la física. Vol. 24. Kevin Urrutia, 1986.
- [2] S. Johansson, "New frequency counting principle improves resolution," Proceedings of the 20th European Frequency and Time Forum, Braunschweig, Germany, 2006, pp. 139-146.
- [3] 1.4 Scientific, Technical, and Industrial Applications of Color Sensing, Color sensor and their applications
- [4] Oppenheim, A. V., & Willsky, A. S. (1997). Signals and Systems (2nd ed.). Prentice Hall.
- [5] Lathi, B. P. (1998). Signal Processing and Linear Systems. Oxford University Press.
- [6] Lyons, R. G. (2010). Understanding Digital Signal Processing (3rd ed.). Prentice Hall.
- [7] Béla G. Lipták (2003). Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis.
- [8] Orfanidis, S. J. (1995). Introduction to Signal Processing. Prentice Hall.
- [9] Sistemas de adquisición de datos. tecnología electrónica. <https://tecnologiaelectron.blogspot.com/2022/12/sistemas-de-adquisicion-de-datos-DAQ.html>
- [10] John M. Hughes (2010). Real World Instrumentation with Python: Automated Data Acquisition and Control Systems.
- [11] "Aliasing". Ingeniería de Telecomunicaciones. <http://aiturrih.com/tratamiento-de-senales/aliasing/>
- [12] Haykin, S. (2001). Communication Systems. Wiley.
- [13] Proakis, J. G., & Salehi, M. (2007). Digital Communications. McGraw-Hill.

- [14] Carlson, A. B., Crilly, P. B., & Rutledge, J. C. (2009). *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication*. McGraw-Hill.
- [15] Sklar, B. (2001). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall.
- [16] Couch, L. W. (2006). *Digital and Analog Communication Systems*. Prentice Hall.
- [17] Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics*. Cambridge University Press.
- [18] Sergio Franco (2002). *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*.
- [19] Behzad Razavi (2012), *RF Microelectronics*.
- [20] Floyd, T. L. (2007). *Digital Fundamentals*. Prentice Hall.
- [21] Ott, H. W. (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley.
- [22] "El principio de funcionamiento del pll". Angelfire: Welcome to Angelfire. <https://www.angelfire.com/al3/PLL/pllfunc.html>
- [23] Bish T, Lee G. (2006). TAOS Colorimetry Tutorial "The Science of Color." Texas Advanced Optoelectronic Solutions
- [24] Itten, J. (1973). *The Elements of Color*. Wiley.
- [25] "Espectro electromagnético". Física Cuántica. <https://edbar01.wordpress.com/segundo-corte/espectro-electromagnetico/>
- [26] Sharma, G. (2003). *Digital Color Imaging Handbook*. CRC Press.
- [27] J.L Barbur, A Stockman. (2010). *Photopic, Mesopic and Scotopic Vision and Changes in Visual Performance*. Elsevier
- [28] "El proceso visual." Recursos docents CITCEA coordinats per Oriol Boix. https://recursos.citcea.upc.edu/llum/luz_vision/p_visual.html

- [29] Backhaus, W. G. K., Kliegl, R., & Werner, J. S. (Eds.). (1998). *Color Vision: Perspectives from Different Disciplines*. Berlin: Springer
- [30] Wandell, B. A. (1995). *Foundations of Vision*. Sinauer Associates.
- [31] Sergey Y. YURISH. (2004). Sensors and Transducers: Frequency Output Versus Voltage Output. *Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest)*, Vol.49, Issue 11, November 2004, pp.302-305
- [32] E. Sánchez. "ISAAC NEWTON: REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ". Medium. https://medium.com/@a20183390_21926/isaac-newton-reflexión-y-refracción-de-la-luz-2fb8052fdd79.
- [33] Fraden, J. (2010). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer.
- [34] TAOS Inc. (2005). TCS3200, TCS3210 Programmable Color Light-to-Frequency Converter. Datasheet. <https://www.mouser.com/catalog/specsheets/tcs3200-e11.pdf>
- [35] Sonka, M., Hlavac, V., & Boyle, R. (2014). *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Cengage Learning.
- [36] Gordon, G. (2003). *Interior Lighting for Designers*. John Wiley & Sons.
- [37] "Sensor de color TCS3200". polaridad.es. <https://victorventura.es/polaridad.es/sensor-color-tcs3200-frecuencia-arduino/>
- [38] Smith, D. R. (2011). *Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry*. John Wiley & Sons.
- [39] Hunt, R. W. (2011). *Measuring Colour* (4th ed.). Wiley.
- [40] [27] Iovine, J. (2000). *PIC Microcontroller Project Book*. McGraw-Hill/TAB Electronics.
- [41] Avalos-Gonzalez, D., Sergiyenko, O., Hernandez-Balbuena, D., Flores-Fuentes, W., ... Constraints definition and application optimization based on geometric analysis of the frequency measurement method by pulse coincidence. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2018, 126, pp. 184–193.

[42] Hernández-Balbuena, D., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., Burtseva, L. Method for fast and accurate frequency measurement. 16th IMEKO TC4 Int. Symp.: Exploring New Frontiers of Instrum. and Methods for Electrical and Electronic Measurements; 13th TC21 Int. Workshop on ADC Modelling and Testing - Joint Session, Proc., 2008, pp. 367–372.

[43] Avalos-Gonzalez, Patricia L. A. Méndez R, Hernández D, José Ramírez M. (2016). Medición de frecuencia por coincidencia de pulso y aproximaciones racionales con aplicación en micro balanzas basadas en FDS de zeolita recubierta. Congreso de instrumentación

[44] Keysight 53131A/132A/181A Counters [Online]. (2017) Disponible: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06688/data-sheets/5967-6039.pdf>

[45] Sanchez Juan de Dios, Fabian N Murrieta-Rico¹, Vitalii Petranovskii². (2019). Effect of phase in fast frequency measurements for sensors embedded in robotic systems. International Journal of Advanced Robotic Systems

[46] Lopez M. (2016) Aplicación del CI TCS3200 como sensor de bajo costo para el mejoramiento de Procesos Industriales Robotizados. MEMORIAS DEL XVIII CONCURSO LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN CLIDi 2016

[47] Rubiola E, Lenczner M, Bourgeois P, Vernotte F. (2016). The Ω Counter, a Frequency Counter Based on the Linear Regression. IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, VOL. 63, NO. 7, JULY 2016

[48] Hernández-Balbuena D, V.E. Tyrsa. (2006). Método para la medición de frecuencia usando aproximaciones racionales. Revista Mexicana de física 52 (4) 359–364
de física 52 (4) 359–36

